



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA INGENIERÍA EN BIOTECNOLOGÍA AMBIENTAL

**“EVALUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE BIOELECTRICIDAD,
MEDIANTE CELDAS DE COMBUSTIBLE MICROBIANAS TIPO
PLANTA, EN AÑA MOYOCANCHA, MULTITUD, ATILLO Y SAN
JUAN, DE LA PROVINCIA DE CHIMBORAZO”**

Trabajo de Titulación

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERA EN BIOTECNOLOGÍA AMBIENTAL

AUTORA: LAURA PATRICIA PILCO JANETA

DIRECTOR: Ing. CELSO GUILLERMO RECALDE MORENO, Dr.

Riobamba – Ecuador

2022

© 2022, **Laura Patricia Pilco Janeta**

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Yo, LAURA PATRICIA PILCO JANETA, declaro que el presente Trabajo de Titulación es de mi autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autora asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Titulación; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 10 de agosto de 2022

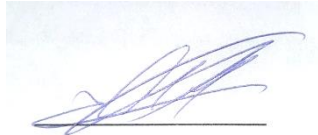




Laura Patricia Pilco Janeta

CI: 0605396241

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA INGENIERÍA EN BIOTECNOLOGÍA AMBIENTAL

El Tribunal del Trabajo de Titulación certifica que: El Trabajo de Titulación; Tipo: Proyecto de Investigación, **EVALUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE BIOELECTRICIDAD, MEDIANTE CELDAS DE COMBUSTIBLE MICROBIANAS TIPO PLANTA, EN AÑA MOYOCANCHA, MULTITUD, ATILLO Y SAN JUAN, DE LA PROVINCIA DE CHIMBORAZO**, realizado por la señorita: **LAURA PATRICIA PILCO JANETA**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	FIRMA	FECHA
Ing. María Soledad Nuñez Moreno, Msc. PRESIDENTE DEL TRIBUNAL		2022-08-10
Dr. Celso Guillermo Recalde Moreno, PhD. DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN		2022-08-10
Dra. Yolanda Dolores Díaz Heredia, Msc. MIEMBRO DEL TRIBUNAL		2022-08-10

DEDICATORIA

El presente trabajo de investigación va dedicado primeramente a Dios y para aquellas personas quienes vivieron buenos y malos momentos en mi vida personal y académica. En especial es un logro personal que he alcanzado gracias al apoyo incondicional de mi Esposo e hijas, Padres, Hermanos y Suegros, quienes en todo momento impartieron palabras de aliento, lo cual fue el motor que me impulso a seguir adelante. El trabajo la dedico a mis dos pequeñas Dayana y Dara, quienes son la razón de superación diaria.

Laura

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por darme la oportunidad de vivir junto a personas maravillosas y especiales y por todas las bendiciones que he recibido cada día.

A mis padres Filiberto y Petrona, hermanos Luis, Segundo, Juan, Ángel, Paul, Sandra, Rosario, Elizabeth, quienes fueron partícipes de este trabajo mediante su confianza, consejos y palabras de fortaleza que me impulsaron a culminar este trabajo.

En especial un profundo agradeciendo para mis Hijas Dayana y Dara quienes complementan el motor de superación y para mi Esposo Emanuel por brindarme su apoyo moral y académica en todo momento.

Al Grupo de Energías Alternativas y Ambiente de la ESPOCH por brindarme la oportunidad de ser partícipe en sus proyectos de investigación.

A mis maestros quienes impartieron sus conocimientos a lo largo de la carrera universitaria.

A mis tutores Dr. Celso Recalde y Dra. Yolanda Días quienes me guiaron en el desarrollo del trabajo mediante su ayuda académica y personal.

A mis amigos y amigas por brindarme su amistad incondicional durante todo el proceso académico.

Laura

TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	x
ÍNDICE DE GRÁFICOS	xi
ÍNDICE DE ANEXOS	xii
RESUMEN	xiii
INTRODUCCIÓN	1

CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL	3
1.1. Antecedentes	3
1.2. Marco Conceptual	5
1.2.1. Variables meteorológicas	5
1.2.2. Energías renovables	7
1.2.3. Celda de combustible	8
1.2.3.1. Celda de combustible microbiano	8
1.2.3.2. Celdas de combustible microbiano tipo planta	9
1.2.3.3. Factores que afectan en el rendimiento de PMFC	9
1.2.4. Método de Whittaker-modificado	10
1.2.4.1. Tipo de muestreo y unidad de muestreo	10
1.2.4.2. Abundancia	11
1.2.5. Recolección y herborización de la planta	11
1.2.5.1. Registro de los datos de la planta a campo	11
1.2.5.2. Recolección de plantas	11
1.2.5.3. Secado y prensado	12
1.2.5.4. Etiquetado de los ejemplares	14
1.2.6. Muestreo de suelos	14
1.2.6.1. Tipos de muestreos de suelos	14
1.2.6.2. Profundidad de muestreo del suelo	15
1.2.6.3. Etiquetado, transporte y refrigeración de la muestra	15
1.2.7. Cultivo microbiano	16
1.2.7.1. Tipos de medios de cultivos	16
1.2.7.2. Recuento de microorganismos en placa	16

1.2.8.	<i>Microorganismos productores de electricidad</i>	17
1.2.9.	<i>Polarización y potencia</i>	17

CAPÍTULO II

2.	MARCO METODOLÓGICO	19
2.1.	Localización del estudio	19
2.2.	Unidad de análisis	20
2.3.	Población de estudio	20
2.4.	Tamaño de la muestra	20
2.5.	Técnicas de recolección de datos	20
2.6.	Tipo y Diseño de la investigación	21
2.6.1.	<i>Tipo de investigación</i>	21
2.6.2.	<i>Diseño de investigación</i>	21
2.7.	Identificación de variables e hipótesis	21
2.7.1.	<i>Identificación de variables</i>	21
2.7.2.	<i>Hipótesis</i>	21
2.8.	Etapas de la investigación	22
2.8.1.	<i>Diversidad vegetal en las estaciones meteorológicas</i>	22
2.8.1.1.	<i>Materiales y equipos implementados en campo</i>	22
2.8.1.2.	<i>Selección de la planta</i>	23
2.8.1.3.	<i>Recolección, prensado e Identificación de la planta</i>	23
2.8.2.	<i>Población microbiana del suelo</i>	24
2.8.2.1.	<i>Materiales, equipos y reactivos</i>	24
2.8.2.2.	<i>Recolección de la muestra de suelo</i>	25
2.8.2.3.	<i>Preparación de medios de cultivo</i>	26
2.8.2.4.	<i>Cultivo microbiológico</i>	27
2.8.2.5.	<i>Conteo microbiológico</i>	28
2.8.3.	<i>Diseño e implementación de las PMFC</i>	29
2.8.3.1.	<i>Equipos, sustancias y materiales</i>	29
2.8.3.2.	<i>Pretratamiento, armado e implementación de los PMFCs</i>	29
2.8.4.	<i>Recolección y análisis de datos</i>	31
2.8.4.1.	<i>Recolección de datos de la generación de bioelectricidad</i>	31
2.8.4.2.	<i>Análisis de Datos</i>	31

CAPÍTULO III

3.	MARCO DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	32
3.1.	Resultados	32
3.1.1.	<i>Selección de la planta</i>	32
3.1.2.	<i>Implementación de la celda de combustible microbiano tipo planta</i>	34
3.1.3.	<i>Variabilidad microbiana en la etapa inicial y final de la implementación de PMFC</i>	35
3.1.4.	<i>Análisis de la producción de bioelectricidad por estación.</i>	40
3.1.5.	<i>Curvas de polarización y potencia de cada zona de estudio</i>	54
3.2.	Discusión	56
	CONCLUSIONES	59
	RECOMENDACIONES	60
	BIBLIOGRAFÍA	
	ANEXOS	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-2.	Coordenadas de las estaciones meteorológicas.....	20
Tabla 2-2.	Materiales y equipos para determinar la diversidad vegetal.	22
Tabla 3-2.	Materiales, equipos y reactivos necesarios para el conteo de microorganismos. .	24
Tabla 4-2.	Equipos, sustancias y materiales para el diseño e implementación de las PMFCs.	29
Tabla 5-3.	Ejemplares de Atillo.....	32
Tabla 6-3.	Ejemplares de San Juan.....	32
Tabla 7-3.	Ejemplares de Multitud	33
Tabla 8-3.	Ejemplares de Aña Moyocancha	33
Tabla 9-3.	Población microbiana en la etapa inicial de la implementación de las PMFC.	35
Tabla 10-3.	Población microbiana posterior a la recolección de datos de voltaje y corriente.	37
Tabla 11-3.	Resumen estadístico de variables meteorológicas.	41
Tabla 12-3.	Estadísticos descriptivos de la producción de voltaje en Atillo.	42
Tabla 13-3.	Test de normalidad de las variables meteorológicas con respecto a las PMFCs. .	45
Tabla 14-3.	Asociación de variables meteorológicas con la producción de voltaje de Atillo.	45
Tabla 15-3.	Resumen descriptivo de corriente y voltaje producidos en Atillo.....	47
Tabla 16-3.	Descripción de variables meteorológicas de Atillo (15 días).....	48
Tabla 17-3.	Correlación entre las variables meteorológicas y corriente-voltaje	49
Tabla 18-3.	Estadísticos descriptivos de corriente y voltaje generado en San Juan	50
Tabla 19-9.	Descripción de las variables meteorológicas de San Juan (15 días)	52
Tabla 20-3.	Correlación de variables meteorológicas con corriente y voltaje en San Juan.	53
Tabla 21-3.	Datos recolectados de corriente y voltaje en Multitud y Aña Moyocancha	53
Tabla 23-3.	Resumen de la densidad de potencia en Atillo	54
Tabla 24-3.	Resumen de la densidad de potencia en San Juan	55

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1.	Distribución de la radiación solar	6
Figura 2-1.	Característica de una curva de polarización	18
Figura 3-2.	Procede de selección de planta para la PMFC	24
Figura 4-2.	Proceso de extracción, transporte y almacenamiento de las muestras de suelos.	26
Figura 5-2.	Preparación de soluciones peptonadas, medios de cultivo y su refrigeración.	27
Figura 6-2.	Proceso de las diluciones de la muestra de suelo y cultivo de las diluciones de 10^{-3} hasta 10^{-6} por duplicado.	28
Figura 7-2.	Contabilización de los microorganismos.	28
Figura 8-2.	Proceso de diseño e implementación de las PMFCs en las estaciones meteorológicas.....	30
Figura 9-3.	Implementación de las PMFCs con los ejemplares abundantes de cada estación meteorológica.....	34
Figura 10-3.	Cultivo de microorganismos de la dilución 10^{-3} hasta la 10^{-6} por duplicado de las muestras de M1, M2, M3, M4 respectivamente.	36
Figura 11-3.	Vegetación existente en el área de muestreo de suelo y la implementación de PMFCs en cada estación meteorológica de la provincia de Chimborazo.....	39
Figura 12-3.	Aspectos generales de los ejemplares implementados en las PMFCs, posterior a la recolección de datos de cada estación meteorológica.....	39

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1-2.	Ubicación de las estaciones meteorológicas.....	19
Gráfico 2-3.	Variabilidad de los microorganismos en la etapa inicial y final de la implementación de las PMFCs.	38
Gráfico 3-3.	Promedio hora de las variables meteorológicas en estudio.....	42
Gráfico 4-3.	Evolución del voltaje según la hora en Atillo.....	43
Gráfico 5-3.	Promedio de Voltaje vs el tiempo (días)	44
Gráfico 6-3.	Evolución horaria de voltaje y corriente.....	48
Gráfico 7-3.	Variables meteorológicas filtradas durante 15 días	49
Gráfico 8-3.	Corriente y voltaje en función del tiempo	51
Gráfico 9-3.	Variables meteorológicas de San Juan en función del tiempo	52
Gráfico 10-3.	Curvas de polarización y potencia de la estación meteorológica de Atillo	55
Gráfico 11-3.	Curvas de polarización y potencia de la estación meteorológica de San Juan. .	56

ÍNDICE DE ANEXOS

- ANEXO A:** CONTEO DE LAS ESPECIES DE PLANTAS EN UN ÁREA DE 1M²
- ANEXO B:** RECOLECCIÓN DE EJEMPLARES DE CADA ESTACIÓN METEOROLÓGICA
- ANEXO C:** PRENSADO DE LOS EJEMPLARES RECOLECTADOS
- ANEXO D:** IDENTIFICACIÓN DE LOS EJEMPLARES
- ANEXO E:** EXTRACCIÓN DE LA MUESTRA DE SUELO
- ANEXO F:** PREPARACIÓN DE MEDIOS DE CULTIVO Y ESTERILIZACIÓN DE LOS MATERIALES
- ANEXO G:** DILUCIONES SERIADAS DE LAS MUESTRAS DE SUELO DE ATILLO, SAN JUAN, MULTITUD Y AÑA MOYOCANCHA
- ANEXO H:** SIEMBRA DE LAS DILUCIONES DE 10⁻³ HASTA LA 10⁻⁶ DE LAS MUESTRAS DE LAS PMFC
- ANEXO I:** CONTEO DE LOS MICROORGANISMOS EN LAS CAJAS PETRI
- ANEXO J:** CÁLCULOS REALIZADOS PARA DETERMINAR LAS UFC/ML DE LAS PMFC
- ANEXO K:** IMPLEMENTACIÓN DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE MICROBIANO TIPO PLANTA CON EL RESPECTIVO EJEMPLAR ABUNDANTE DE CADA ESTACIÓN METEOROLÓGICA
- ANEXO L:** CONEXIÓN DE LAS PMFC AL RECOLECTOR DE DATOS
- ANEXO M:** PROGRAMACIÓN UTILIZADA PARA RECOLECTAR DATOS DE LA GENERACIÓN DE BIOELECTRICIDAD
- ANEXO N:** ESQUEMA DE LAS CONEXIONES DE LAS PMFC

RESUMEN

La investigación se realizó con el fin de evaluar la generación de bioelectricidad mediante Celdas de Combustible Microbiano Tipo Planta (PMFC), en las estaciones meteorológicas de Atillo, San Juan, Multitud y Aña Moyocancha. El ejemplar predominante de cada estación se identificó por método de Whittaker modificado, se implementaron 12 PMFCs, 3 en cada estación, expuestas a condiciones ambientales de cada lugar, las PMFCs fueron construidas de fibra de carbono, tubo de cerámica y PVC, la variabilidad de la población microbiana se verificó por Unidades Formadoras de Colonias (UFC) tanto al principio y final de la implementación, cultivado por extensión en placa. Los resultados obtenidos de la generación eléctrica en Atillo fue un máximo de 0,064 V (voltios); 0,151 V y 0,089 V recolectados por data logger y 0,00165 V; 0,16946 V y 0,00223 V de voltaje y 0,00018 A (amperio); 0,01401 A y 0,00019 A de corriente con el prototipo casero; en San Juan se obtuvo voltaje de 0,1519 V; 0,0492 V y 0,0321 V y corriente de 0,0186 A; 0,0069 A y 0,0039 A, valores obtenidos en PMFC1, PMFC2 y PMFC3 respectivamente. La variabilidad microbiana aumentó en Atillo, San Juan y en PMFC3 de Multitud y Aña Moyocancha, mientras que en PMFC1 y PMFC2 disminuyó, esto pudo ser provocado por factores ambientales como la precipitación, condición de la planta etc., que no fueron consideradas; la curva de polarización y potencia mostró una tendencia creciente en Atillo, mientras que, en San Juan se asemeja a una línea recta, la condición ambiental que se relacionó con la generación eléctrica fue la temperatura ambiente, temperatura de suelo (-10cm) y radiación solar, aunque no todas fueron significativas. En conclusión, se verificó que las plantas generan electricidad en pocas cantidades, se recomienda usar otras plantas y analizar otros factores ambientales.

Palabras clave: <BIOELECTRICIDAD>, <MICROORGANISMOS>, <VOLTAJE>, <CORRIENTE>, <POLARIZACIÓN>, <POTENCIA>, <HERBORIZACIÓN>, <CELDA DE COMBUSTIBLE MICROBIANO TIPO PLANTA (PMFC)>.



1825-DBRA-UTP-2022

SUMMARY

The aim of the research was to evaluate the generation of bioelectricity using Plant-Type Microbial Fuel Cells (PMFC), in Atillo, San Juan, Multitud and Aña Moyocancha meteorological stations. The predominant specimen of each station was identified by means of the modified Whittaker method, 12 PMFCs were implemented, 3 in each station and they were exposed to the environmental conditions of each site. The variability of the microbial population was verified with the use of Colony Forming Units (CFU) at the beginning and end of the implementation and cultivated by extension plate. The results obtained from the electrical generation in Atillo were a maximum of 0.064 V (volts); 0.151 V and 0.089 V, which were collected with a data logger and 0.00165 V; 0.16946 V and 0.00223 V of voltage. 0.00223 V of voltage and 0.00018 A (ampere); 0.01401 A and 0.00019 A of electric current with the home prototype. In San Juan, a voltage of 0.1519; 0.0492 V and 0.0321 V and electric current of 0.0186 A were obtained; 0.0069 A and 0.0039 A, these values were obtained in PMFC1, PMFC2 and PMFC3 respectively. The microbial variability increased in Atillo and San Juan, PMFC3 also increased in Multitud and Aña Moyocancha, while PMFC1 and PMFC2 decreased due to environmental factors such as precipitation, plant condition, etc., which were not taken into account. The polarization and power curve showed an increasing trend in Atillo, while in San Juan it resembles a straight line. The environmental conditions related to electrical generation were ambient temperature, soil temperature (-10cm) and solar radiation, although these values were not all significant. In conclusion, it was evidenced that the plants generate small amounts of electricity; thus, it is recommended to use other plants and analyze other environmental factors.

Keywords: <BIOELECTRICITY>, <MICROORGANISMS>, <VOLTAGE>, <CURRENT>, <POLARIZATION>, <POWER>, <HERBORIZATION>, <PLANT-TYPE MICROBIAL FUEL CELL (PMFC)>.



Firmado electrónicamente por:
PAUL ROLANDO
ARMAS PESANTEZ

Lic. Paul Rolando Armas Pesantez

C.I: 0603289877

INTRODUCCIÓN

El constante y marcado incremento de la población ha generado una gran demanda del consumo energético y el asentamiento en lugares remotos impiden el acceso al servicio eléctrico que satisfaga las necesidades básicas, por lo que la explotación indiscriminada de recursos fósiles va en aumento, siendo uno de los grandes problemas el agotamiento de recursos no renovables, pérdida de cobertura boscosa, vegetal y la biodiversidad (Zapien et al., 2019, p. 1). Las actividades de extracción del recurso fósil y su transformación a energía provocan contaminación del suelo, agua y aire, siendo el ecosistema del suelo con más afecciones que presentan erosiones, acidificación, salinización y contaminación con metales pesados que ha provocado baja producción agrícola y desplazamiento de grupos étnicos. Por tales motivos, esfuerzos a nivel mundial están siendo realizados con la finalidad de investigar y desarrollar tecnologías de producción de energías alternativas y amigables con el medio ambiente que complementen o sustituyan paulatinamente a las energías tradicionales no renovables (Gonzales et al., 2017, pp. 5-11). Una de las tecnologías emergentes es la de producción de bioelectricidad mediante la descomposición de materia orgánica por actividad microbiana y las PMFC.

Actualmente en el Ecuador, y más específicamente **en la provincia de Chimborazo, son escasas las investigaciones relacionados en la producción de bioelectricidad con recursos renovables autóctonas, sujetos a las condiciones físicas y climatológicas propios del sector.** El Grupo de Energías Alternativas y Ambiente (GEAA) a pesar de tener experiencia en la producción de energía limpia mediante celdas microbianas **no cuenta con investigaciones profundizadas en la generación de bioelectricidad mediante plantas en simbiosis con los microorganismos autóctonos del suelo.** Por tanto, las celdas se implementarán dentro de cuatro estaciones meteorológicas de Aña Moyocancha, Multitud, Atillo y San Juan, pertenecientes al GEAA.ESPOCH, distribuidas en la provincia de Chimborazo.

La evaluación de la generación de energía eléctrica mediante el uso de celdas de combustible microbiana tipo planta, permitirá estimar la producción de energía limpia sin afectar el desarrollo social, económico y ambiental, también, contribuirá en el desarrollo del país sin comprometer el bienestar de las futuras generaciones, además se debe impulsar y dar apoyo a este tipo de investigaciones debido a que a nivel local es un tema ambiguo. GEAA ha desarrollado diferentes trabajos de titulación con diversos enfoques químicos, físicos y electrónicos en celdas de combustible microbiano, mas no con PMFC, por tanto, el estudio se desarrollará con recursos renovables autóctonas que predomine en la estación meteorológica de Aña Moyocancha, Multitud, Atillo y San Juan. Los datos de producción energética se obtendrán mediante dispositivos de adquisición de datos, los cuales, permitirán obtener curvas de polarización y

potencia para conocer la factibilidad y eficiencia de cada planta y formalizar investigaciones según las condiciones de cada zona que sirvan para futuras investigaciones.

OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

Objetivo General

Evaluar la producción de bioelectricidad mediante celdas de combustible microbianas tipo planta en Aña Moyocancha, Multitud, Atillo y San Juan, pertenecientes a la provincia de Chimborazo.

Objetivos Específicos:

- Determinar la variabilidad de la población microbiana del sustrato en la etapa inicial y final del estudio.
- Implementar tres prototipos de la celda de combustible microbiano tipo planta dentro de las estaciones meteorológicas seleccionadas.
- Determinar las curvas de polarización y potencia de cada zona de estudio.
- Evaluar el desempeño de la producción de electricidad de acuerdo a la radiación solar directa, temperatura ambiente y temperatura del suelo.

CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

1.1. Antecedentes

El desarrollo del trabajo de investigación se basó en diversos estudios relacionados al tema de investigación, las mismas que se detallan a continuación: El incremento de la población mundial ha causado la explotación indiscriminada de recursos fósiles que han servido de materia prima para satisfacer las necesidades del hombre (Zapien et al., 2019, p. 1), y la ubicación geográfica de las poblaciones han impulsado realizar investigaciones en el área de obtención de bioelectricidad a partir de la vegetación viva, todas las plantas realizan el proceso de la fotosíntesis que captan la energía del sol y utilizan en sus procesos biológicos y el exceso de nutrientes eliminan como rizo deposiciones por medio de las raíces, en donde los microorganismos presentes degradan esos depósitos liberando electrones (Cebada, 2017, p.5), las mismas que son captadas por los electrodos que puede ser de material de cobre y zinc como ánodo y cátodo respectivamente que captan el flujo de electrones libres y las convierten en electricidad, estudios mencionan que $1 m^2$ de planta genera 0,4 watts aproximadamente ya sea de noche y de día (CHUET-MISSÉ, 2017, p.7). La vegetación utilizada para las investigaciones debe ser predominantes de cada región de estudio para que puedan adaptarse fácilmente a las condiciones climáticas y no sufran ningún tipo de estrés (Zapien et al., 2019, pp. 1-6), además deben ser plantas hidrofitas o macrofitas que tengan resistencia a la asfixia radicular por la ausencia de oxígeno en las raíces (PortalFruticola, 2020).

El avance tecnológico ha permitido progresar las investigaciones de generación de bioelectricidad mediante recursos renovables, debido al gran avance de la ciencia han creado una maceta inteligente con circuitos en serie y paralelos que recolectan la generación eléctrica y almacenan en un dispositivo que permite cargar el teléfono móvil, para ello han utilizado Aloe barbadensis (Sábila), Sansevieria trifasciata (Lengua de Tigre), Pelargonium citrosum (Citronela) y Gazania x hybrida (Gazania) con ánodos y cátodos colocados en la rizosfera de cada una de las plantas, obteniendo la producción de 0,40-0,80V; 0,21-0,44V; 0,67-0,74V y 0,78-0,93V respectivamente (Gonzales et al., 2017, pp. 5-11). Las de plantas ornamentales de Helecho, Gardenia, Hortensia y Azalea, han sido utilizadas por su alta eficiencia fotosintética, fácil cultivo y adaptabilidad, estas han sido aclimatadas a 26 °C, fertilizadas con lixiviado de lombricomposta, riego de agua cada día y sustrato 1:1 de tierra negra con agrolita, el experimento se ha realizado con circuitos en serie, utilizando ánodo de zinc y cátodo de cobre ubicados a 5cm de las raíces y la generación de electricidad han evaluado con 7 leds de diferentes voltajes, obteniendo como resultados la generación de 2,83 V; 2,49 V; 2,45 V y 1,97 V en plantas de Gardenia, Hortensia, Helecho y

Azalea respectivamente (Lara et al., 2020, p. 14). Mediante la utilización de materiales reciclables como latas de aluminio (electrodos), macetas, alambre de cobre (conductor de electricidad), Agar-agar y tubo de PVC de ½ in (selector de los microorganismos) y plantas de Bugambilia (*Bougainvillea*), Menta (*Mentha spicata*), árbol de la abundancia (*Portulacaria Afra*) y Vicaria (*Catharanthus roseus*), han obtenido 105,76 mV; 112,68 mV; 134,46 mV y 121,28 mV respectivamente, además han analizado los factores que pueden influir en la producción de bioelectricidad, concluyendo que la humedad no afecta en dicha producción (Góngora et al., 2017, pp. 54-62).

Las celdas de combustible microbiana han sido construidas de vidrio con capacidad de 350ml, en ella han colocado biocatalizadores con pH entre 5-6 y sustrato sintético de agua residual, la celda se ha realizado de dos compartimientos unidos con la membrana Nafion 117, las mismas que conducen cargas positivas, el cátodo y ánodo de papel carbón con catolito acuoso y microorganismos respectivamente, el experimento se ha realizado en condiciones mesófilas”, anaerobias con tres transferencias secuenciales del inóculo, de esta manera han obtenido la producción de electricidad constante, la misma que ha sido detectada por multímetro marca Fluke, registrando un voltaje constante en 120 días de 0,88mA (Alzate et al., 2008, pp. 503-509).

Las celdas de combustibles microbianas tipo planta se denominan sistemas bioelectroquímicos que generan electricidad continua a través de interacciones entre microorganismos con plantas expuestas a la radiación solar directa, la implementación en diversos cultivos no presenta efectos negativos o alteraciones en su rendimiento de producción agrícola, por ello posee gran campo de investigación debido a que se puede realizar biorremediación de lodos, lixiviados, aguas superficiales, aguas residuales, etc., que mitigan los gases de efecto invernadero, pudiendo ser una fuente alternativa para la generación de electricidad que utilicen recursos renovables para su obtención. En la revisión bibliográfica encuentran diversas investigaciones con sus respectivas aplicaciones, de las cuales la más interesante es la utilización de plantas macrófitas que viven dentro del agua o flotando en ella y los rizo depósitos las utilizan como bioelectrodos en la producción de bioelectricidad y vasculares que viven en abundante agua con sustrato, como el arroz que ha producido $67 \text{ mW}/\text{m}^2$ las evaluaciones de la generación de bioelectricidad lo han desarrollado de manera in situ y ex situ (Tetteh et al., 2019, pp. 402-414).

Diversos grupos de investigadores en India han implementado el prototipo de celda de combustible microbiana tipo planta, el prototipo es de bajo costo y muy sencillo de realizar, debido a la utilización de estructuras cilíndricas de arcilla, recubierta de fibra de carbono que sirve como ánodo y cátodo, y conexiones de cobre, las plantas implementadas han sido 2 leguminosas y un tubérculo colocados en la parte del ánodo con sustrato de compost, mientras que el cátodo

se encuentra al aire libre, la recolección de datos se ha realizado mediante el sistema de adquisición de datos, obteniendo como resultado 505 mV, 523 mV y 485 mV en *Canna Stuttgart*, *Brassica juncea* y *Trigonella foenum-graecum* respectivamente, además han realizado cultivo de microorganismos existentes en las raíces de las plantas con el fin de verificar la población microbiana existente (Carmalin y Sreeja, 2017, pp. 59-66). El Centro para el Control de la Contaminación y el Medio Ambiente Ingeniería (CPCEE) ubicada en India, menciona que se ha implementado PMFCs por triplicado en 9 m² de cultivo de arroz, utilizando tubo de PVC y arcilla como aislante entre los electrodos (filtro de grafito), en la cual obtienen como resultado 292,1 y 321,7 mV en tipo I y tipo II respectivamente, el experimento se ha realizado a campo abierto donde identifica el suelo como franco arenoso, clima tropical de 30°C y humedad relativa de 70-85% (Kiran et al., 2020, pp. 270-281). El instituto nacional de investigaciones del cultivo de arroz ha utilizado la especie de *Oryza sativa ssp.*, con sustrato de suelo y vermiculita, las mismas que han sido alimentadas con soluciones nutritivas en cada PMFCs, los electrodos utilizados fueron varilla de grafito (ánodo) con microorganismos metanogénicos y ultrex (cátodo) en conjunto con la bomba de aire, la producción de bioelectricidad ha aumentado de 695 a 800 mV con suelo en los 204 días y con vermiculita 760 mV en 104 días, además concluye que los circuitos abiertos generan mayor cantidad de voltaje (Schampelaire et al., 2008, pp. 3053-3058).

En la universidad Yamaguchi, Japón se ha realizado la prueba de la celda de combustible microbiana tipo planta con arroz, para ello ha utilizado 6 baldes de plástico, de las cuales el 3 y 4 contenían 1:3 de suelo y compost con planta, el 6 tenía la mezcla, pero no contenía planta de arroz y el 1,2 y 5 solo contenía suelo, la captación de los electrones liberados de la descomposición bacteriana se ha captado por fibra de carbono que ha servido como cátodo y ánodo, el área del ánodo en el experimento ha cubierto una superficie de 125 cm² a una profundidad de 5cm y una resistencia externa de 100Ω para cada experimento, las medidas de corriente se ha realizado una medida al día, obteniendo el pico más alto de 700 mV en plantas de arroz con compost y baja producción en el resto, además menciona que la generación de bioelectricidad al principio se ha incrementado hasta obtener un dato contante y cuando la planta estuvo lista para ser cosechado la producción ha reducido considerablemente (Moqsud et al., 2015, pp. 63-69).

1.2. Marco Conceptual

1.2.1. Variables meteorológicas

Las variables meteorológicas son fenómenos que se dan en la atmosfera al transcurrir el tiempo, a continuación, se explican algunas de ellas:

- Temperatura: representa el movimiento caótico de las partículas que conforman la materia. Es decir, a mayor agitación su temperatura aumenta significativamente (Rodríguez, Capa y Portela, 2004). Se distingue dos tipos de temperatura, temperatura de suelo, la misma que decrece a mayor profundidad y es inferior a la temperatura del aire debido a la interacción íntima de las raíces de la planta con el suelo; y la temperatura ambiente o temperatura de aire varía según el movimiento del aire en la atmósfera y es la principal causante de fenómenos meteorológicos como huracanes, tormentas, entre otros, además sirve como transporte de vectores y enfermedades. La temperatura se mide usualmente en °C (Cárcer y Carral, 2009).
- Radiación solar: La radiación emitida por el sol a la tierra comprende desde los rayos gamma, rayos X hasta ondas de radio. De toda la energía solar que llega a la capa externa del planeta, esta es filtrada y solo una parte de ella pasa a la atmósfera (Casas y Alarcón, 1999). En la atmósfera se da una serie de interacciones de la radiación y la atmósfera, provocando procesos de reflexión dispersa o especular, dependiendo si la incidencia del rayo se dio en material rugoso o liso; transmisión, es decir la radiación emitida no es interrumpida por ningún factor; y absorción que se da por las partículas, gases presentes en la atmósfera (Zúñiga y Arco, 2015).

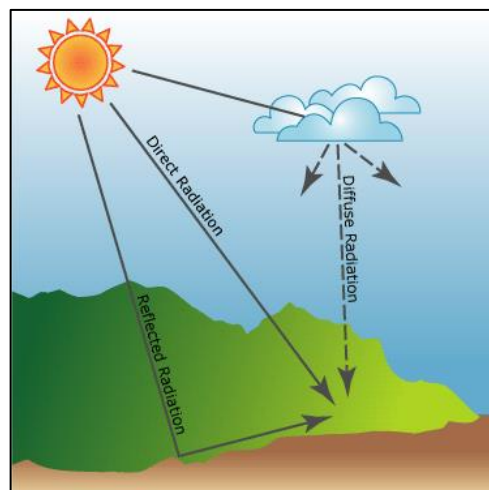


Figura 1-1. Distribución de la radiación solar

Fuente: Esri, 2019.

Los cálculos de la radiación se realizan mediante ecuaciones que incluyen muchos factores relacionados a la atmósfera, Angulo, incidencia, etc., las mismas que determinan cada tipo de radiación, sin embargo, podemos citar de manera general una fórmula que permite hallar la radiación directa a partir de la diferencia de radiación global y radiación difusa (Vanegas et al., 2017).

$$I_{DH} = I_{TH} - I_{dH}$$

Donde:

I_{DH} : radiación directa

I_{TH} : radiación global

I_{dH} : radiación difusa

1.2.2. Energías renovables

Las energías renovables surgen de recursos inagotables como energías limpias que no emiten contaminantes a la atmósfera, suelo y agua, durante su transformación de energía química a electricidad, además ayudan a mitigar el cambio climático que no presenta efectos negativos en los demás seres vivos y son reversibles (Góngora et al., 2017, pp. 54-62). Las energías renovables se originan de la radiación solar, por ende, tenemos energía solar, hidroeléctrica, biomasa y eólica, sin embargo, la geotérmica no se origina del sol, debido a que se produce de forma natural por las reacciones químicas que se desarrollan dentro del suelo, este tipo de energías se renuevan periódicamente para satisfacer las necesidades del ser humano (Hernández, 2016, pp. 15-16).

Hernández (2016, p. 15-16) enlista los siguientes tipos de energías renovables, a continuación:

- **Energía solar:** El yacimiento energético del sol es inagotable, la radiación que llega a la tierra es de forma directa como los rayos del sol en un día soleado, mientras que la radiación difusa llega a través de las moléculas del gas y agua hasta llegar al suelo. En la actualidad utilizan placas solares, efecto fotovoltaico que aprovechan el efecto térmico y radiación solar respectivamente, el uso de este tipo de energía cada vez más entra en competencia con los combustibles convencionales.
- **Energía hidroeléctrica:** La energía hidroeléctrica se obtiene mediante turbinas hidráulicas que generan energía cinética, las mismas que son transformadas en electricidad, las turbinas usualmente se encuentran ubicados en los cauces de los ríos, riachuelos, etc.
- **Energía eólica:** La superficie de la tierra está formada por diversos pisos altitudinales y diversos climas, por ello existen zonas de altas y bajas presiones que provocan el desplazamiento de masas de aire caliente que generan vientos fuertes, estos vientos son precursores de la generación de energía eólica que es obtenida mediante turbinas de viento.
- **Energía de biomasa:** La vegetación utiliza la radiación del sol para los procesos metabólicos y su crecimiento, el ser humano ha utilizado la vegetación como árboles, residuos agrícolas, leñas para generar calor, las mismas que ha servido para calentar el hogar.
- **Energía geotérmica:** La energía geotérmica es extraída con dispositivos térmicos desde el interior del suelo, en ella se producen flujos de calor a causa del gradiente térmico y diversas reacciones químicas provocadas naturalmente.

1.2.3. Celda de combustible

Las celdas de combustión son dispositivos electroquímicos que captan la energía química y las convierten en electricidad, estas celdas funcionan con electrodos, compuestos de un ánodo y cátodo, separados por un aislante que puede ser de material de cerámica, barro, etc. Estos tipos de celda no se agotan como una batería, más bien son inagotables y pueden utilizar cualquier tipo de combustible que contengan hidrogeno en su composición. El hidrogeno al pasar por un electrodo se oxida, lo que causa la pérdida de un electrón, el electrón es transportado por un conductor externo y el hidrogeno oxidado a través del electrolito hasta llegar al cátodo, allí ocurre reacciones de oxidación y reducción y da como resultado la generación de electricidad, agua 100% pura y calor útil en forma de energía térmica. Las celdas de combustible se basan en las leyes de Faraday, durante su implementación desprende calor provocando una reacción exotérmica (Castillo, 1999, p. 208-209). Los biocombustibles utilizados para este tipo de celdas se pueden obtener de la descomposición de residuos sólidos y líquidos como el bioetanol, biogás, hidrogeno gaseoso, etc., además se puede implementar microorganismos que generan H₂ y liberan electrones que son transferidos de forma directa al ánodo para la generación de bioelectricidad (Alzate et al., 2008, pp. 503-504). Las celdas de combustible poseen diversas clasificaciones de acuerdo a su función, por la membrana que utilizan, etc., a pesar de ello se detallan dos tipos de celdas de combustible.

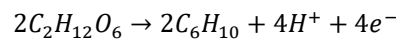
1.2.3.1. Celda de combustible microbiano

Las celdas de combustible microbianos son tecnologías avanzadas que se utiliza para la producción de electricidad, remediación de aguas residuales, lodos, etc., en su estructura cuentan con electrodos que captan los electrones, protones y membradas iónicas selectivas, el sustrato implementado puede ser natural o artificial y circuitos interconectados a los electrodos para la captación de electricidad (Hernández y Ibáñez, 2010). Según (Pant et al., 2010, p. 1533-1543), menciona que existe dos tipos de celdas de combustible microbiano que son de una sola cámara, en la cual se encuentra el ánodo introducido en el sustrato con los microorganismos en condiciones anaerobios y el cátodo expuesto al aire libre; las celdas de combustible de dos cámaras, se interconectan con la membrana de intercambio protónico que selecciona los iones generados por los microorganismos de la cámara anódica y transporta al cátodo donde se combina con el oxígeno para producir electricidad, agua y CO₂.

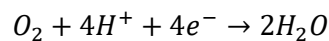
1.2.3.2. Celdas de combustible microbiano tipo planta

Las celdas de combustible microbiana tipo planta (cuya inicial en inglés es PMFC), implementan bacterias electrogénicas en simbiosis con las plantas para generar electricidad basándose en dos procesos principales: Rizodeposición, Las plantas captan la energía lumínica a través de las hojas, esta luz es utilizada para el proceso de fotosíntesis, la cual se da por la excitación de electrones produciendo energía química para su metabolismo y el exceso de carbono es excretado a sus raíces como rizo depósitos; diversas bacterias mineralizan la materia orgánica, en la cual libera electrones (Figueredo, Olaya y Cortón, 2014, p. 45). Los electrones liberados durante el proceso de rizo deposito, degradación bacteriana, fotosíntesis, etc., pueden ser captados por una pila eléctrica formado por cátodo y ánodo que transforman la enérgica química en bioelectricidad (Zapien et al., 2019, pp. 1-6). En el ánodo la glucosa, se reduce a compuestos más simples, electrones y protones, mientras que en el cátodo se unen los electrones con el oxígeno para formar agua, a continuación, las reacciones ocurridas en cada electrodo:

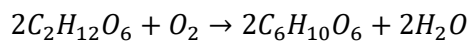
Ánodo:



Cátodo:



Reacción general:



1.2.3.3. Factores que afectan en el rendimiento de PMFC

Morales (2020, pp. 8-9), menciona que existen factores ambientales como pH, salinidad, materia orgánica, población microbiana, demanda de oxígeno, temperatura, etc., y factores de diseño como material de los electrodos, tiempo de retención hidráulica, distancia de los electrodos, material del recipiente contenedor, resistencia externa, etc., que afectan de forma directa en la producción de bioelectricidad en celdas de combustible microbiano tipo planta (PMFC), sin embargo, la cantidad de electricidad generada depende principalmente del voltaje y corriente, como indica en la siguiente ecuación:

$$P = E * I$$

Donde:

P: Potencia en vatios (W)

E: Voltaje (V). se halla de la conversión entre electrodos menos la pérdida del sistema.

I: Corriente (A)

1.2.4. Método de Whittaker-Modificado

El método modificado surge del método de cuadrante anidada, diseño de parcela de Whittaker y parcelas con formas de triángulos, las mismas que han sido utilizadas en diversos estudios florísticos con eficiencia (García, 2015). Sin embargo, ha surgido la necesidad de implementar un método efectivo para evaluar y contabilizar especies de vegetación en áreas de gran tamaño, por ello se ha realizado el método de Whittaker-modificado, la cual es un método estandarizado que permite conocer con gran certeza la cantidad de cada una de las especies en una determinada área y facilita llevar a cabo inventarios de recursos que permitirán monitorear los cambios producidos a largo plazo (Stohlgren, Falkner y Schell, 1995, p. 113-121).

La parcela posee 50m ancho, 20m de largo, dentro de esta gran parcela se sobrepone subparcelas de 20x5m; 2m², 1m², las mismas que poseen distribuciones anidadas del método de Whittaker (Stohlgren, Falkner y Schell, 1995, p. 113-121). El área mínima a considerar dentro del método modificado depende de la comunidad vegetal, homogeneidad y temperatura de la zona (Mueller-Dombois y Ellenberg, 1974, pp. 45-66). Los cuadrantes se pueden utilizar para medir la frecuencia, densidad, cobertura o biomasa, cada tipo de vegetación requiere de diferentes cuadrantes, por ello definen áreas entre 0,01-0,25m² para comunidades de algas, líquenes y briofitas con mayor densidad de plantas; 0,25-16m² para macrofitas acuáticas, pastizales, arbustos cortos y hiervas largas; 25-100m² para arbustos altos; y 400-2500m² para bosques y selvas (Sutherland, 2006).

1.2.4.1. Tipo de muestreo y unidad de muestreo

Existen dos tipos de muestreo, como el aleatorio estratificado que consiste en estratificar en estratos o comunidades al área de estudio y la selección de la muestra es aleatorio, y sistemático estratificado en el que la muestra sigue un patrón sistemático que permite detectar variaciones en el tiempo (Ministerio de Ambiente, 2015, p.20). La unidad de muestreo llamadas parcelas fijas poseen formas cuadradas, circulares y rectangulares por su facilidad de identificación de especies, los circulares presentan menor efecto de borde, los cuadrados y rectangulares presentan la probabilidad de encontrar especies en el límite de la parcela. Para comunidades arbustivas, matorrales se puede implementar cualquier tipo de parcelas equidistantes entre sí de 100m y para praderas o herbazales se puede implementar transeptos o unidades muestrales de 1m² y 2m² en zonas altoandinas, dependiendo de la vegetación ralo o muy ralos (Ministerio de Ambiente, 2015, pp.24-25).

1.2.4.2. Abundancia

Las formaciones arbustivas se determinan mediante la abundancia absoluta y abundancia relativa, utilizando la siguiente formula, (Ministerio de Ambiente, 2015, pp.24-25):

$$Ab = \frac{\# \text{ de individuos}}{\# \text{ especies} * A}$$

$$Ar = \frac{n}{N} * 100$$

Donde:

Ab: Abundancia absoluta

Ar: Abundancia relativa:

N: total de individuos (cantidad de todas las especies)

n: número de individuo de cada especie

A: área

1.2.5. **Recolección y herborización de la planta**

1.2.5.1. *Registro de los datos de la planta a campo*

Los registros de los datos de la planta a campo es una práctica muy implementada en la actualidad, este tipo de registro se realiza en libretas de campo o en formulario de registro de datos antes de la recolección de las plantas para evitar la pérdida de información del lugar de recolección y la vegetación circundante. Los expertos en dicha área solo utilizan libretas de campo, sin embargo, es recomendable que los principiantes utilicen el formulario como recordatorio de los datos a tener en cuenta antes de proceder a extraer el ejemplar (Biurrun, 2016, p. 4).

1.2.5.2. *Recolección de plantas*

Los herbarios poseen diversos ejemplares de plantas como registros de la biodiversidad existente en cada país, región y localidad, los registros son indispensables que permiten la realización de estudios sistemáticos, florísticos, ecológicos y fitogeográficos, además se considera como una herramienta útil debido a que permite realizar comparaciones de especies, identificación y en el área científica permite conocer si la especie en estudio es una nueva especie en descubrimiento (Moreno, 2007, p. 417). Por ende, es importante aplicar técnicas adecuadas para la recolección y prensado, ya que, de la técnica implementada, tamaño de la muestra y prensado, depende la identificación óptima de las especies y su posterior conservación, según (Sánchez y González, 2007,

p. 123-133), menciona que existen diversos métodos de recolección de ejemplares, dependiendo del tipo de planta a la cual pertenecen, a continuación, se detalla los tipos de plantas:

- Plantas no vasculares

Las briofitas son plantas de tamaños pequeños que varían usualmente entre 0-10cm, en casos especiales las plantas llegan a tener una altura máxima de 30cm, en este tipo de plantas se incluyen las hepáticas, antoceros y los musgos, se caracterizan por ubicarse a la cercanía de fuentes de agua, zonas húmedas con poca intensidad lumínica. Los gametofitos poseen ciclo de vida larga y su reproducción es sexual, mientras que los esporofitos poseen vida corta y su reproducción es mediante esporas. La recolección de la muestra debe ser por triplicado, el autor recomienda extraer 13,5x10 cm o el tamaño de la palma de la mano y colocar en envolturas de papel periódico o bolsas plásticas.

- Plantas vasculares

Los helechos y plantas a fin denominadas pteridofitas poseen órganos fotosintéticos similares a otras plantas vasculares, su tamaño varía de pequeño a grande, sin embargo, la mayoría de las plantas poseen tamaños intermedios, las esporas se encuentran situadas en las frondas con diversas formas de arreglos. La recolección se realiza de toda la planta por triplicado si es posible, caso contrario se extrae los rizomas, bases, puntas y el tallo principal con sus pelos y escamas, además debe realizar apuntes de la planta para facilitar la identificación, las muestras extraídas no deben poseer daños físicos, insectos, raíces extrañas y deben ser vigorosas, la planta se coloca en bolsas plásticas hasta el momento del prensado.

Las angiospermas son plantas que poseen hojas, flores y frutos, son consideradas como plantas bien desarrolladas debido a que tienen un recubrimiento para sus frutos y órganos reproductores, mientras que las angiospermas no poseen recubrimiento en sus órganos y frutos, a pesar de ello la recolección se realiza similar para ambos casos, las plantas vasculares pequeñas se recolectan con sus raíces o tubérculos subterráneos, en caso de plantas de gran tamaño se recolecta una parte de tallo, hojas, flores y frutos, cada muestra por triplicado con su respectiva etiqueta .

1.2.5.3. Secado y prensado

El secado se implementa solo para las plantas no vasculares, para ello se extiende la muestra dentro de la bolsa de papel, esta técnica se aplica solo para pocas especies de este grupo y la mayoría son analizados en fresco, mientras que las plantas vasculares sin excepción alguna se someten a la técnica del prensado, para ello las frondas se colocan sobre el papel periódico procurando que se demuestren las caras adaxial y abaxial y las hojas deben demostrar las caras del haz y envés, y si su tamaño excede se corta igual a la hoja estándar del herbario (30x42cm)

de forma transversal, las semillas se colocan en bolsas de papel y el fruto grande se corta en rebanadas o por la mitad (corte longitudinal) (Sánchez y González, 2007, p. 123-133). Las plantas de gran tamaño como el pasto alto, cactus, enredaderas, etc., se colocan una muestra significativa doblando de forma V, M y N, en caso de colocar una parte de la planta se acomoda de diversas formas sobre el papel periódico antes de prensar, como se muestra en la figura 2-1 (Biurrun, 2016, p. 8).

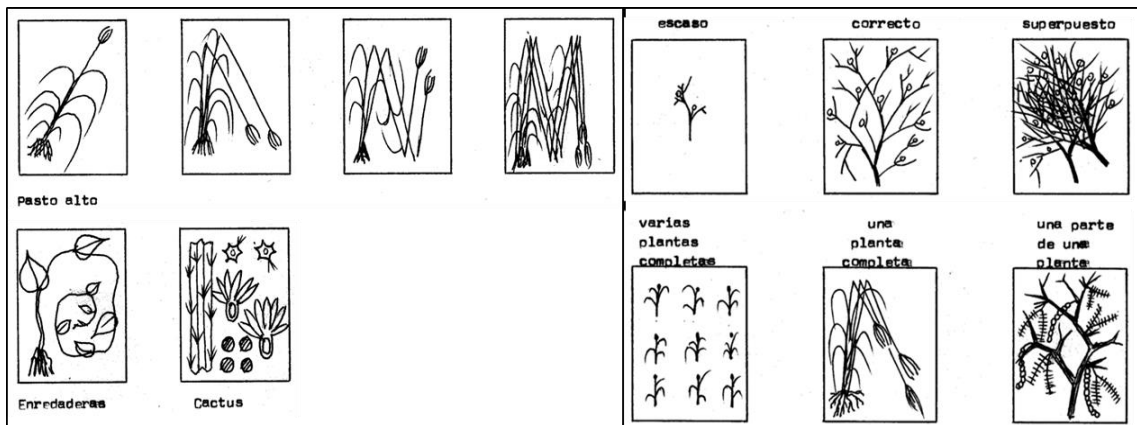


Figura 2-1. Disposición de ejemplares completos o una parte de ellos

Fuente: Biurrun, 2016.

Los ejemplares obtenidos se colocan en la prensa con papel absorbente y cartón corrugado entre las muestras de las plantas, para el prensado se utiliza prensas de madera ajustables con tuercas a cada extremo como se muestra en la figura 3-1 o a su vez se colocan entre libros de gran tamaño, cada 24h se debe revisar las muestras, si en ese lapso se ha secado se procede a retirar, caso contrario se cambia las hojas absorbentes por unas nuevas y se verifica que el cartón corrugado no este compacto, debido a que cumple la función de airear la muestra y optimizar el proceso de secado, posteriormente se lleva a un herbario para su identificación (Cires, 2012, pp. 1-5).



Figura 3-1. Prensado de los ejemplares

Fuente: Cires, 2012.

1.2.5.4. Etiquetado de los ejemplares

Cada ejemplar recolectado debe tener su respectiva etiqueta, la misma que va de acuerdo al formulario de registro de datos a campo, la etiqueta debe contener el nombre común de la planta, número de la etiqueta, nombre del colector, fecha de recolección, ubicación, coordenadas y el tipo de vegetación (UEB, 2015).

1.2.6. Muestreo de suelos

El suelo es la base de la existencia de todo ser vivo, en ella se dan reacciones físicas, químicas y procesos biológicos que permiten evolucionar, además brindan servicios ecológicos como el suministro de nutrientes para el desarrollo de plantas, captación de carbono, control de gases de efecto invernadero, descontaminación, filtración y purificación de cuerpos de agua, etc. Todo ello se da mediante la composición, textura y granulometría de suelos (Mendoza y Espinosa, 2017, p 8) . El muestreo de suelo consiste en extraer una porción representativa del suelo que demuestre las características propias del sitio, para el muestreo, primero debe delimitar un área de estudio mediante croquis, salidas al campo, observar la homogeneidad del suelo, la vegetación presente, ubicación del área de estudio y conocer las vías de acceso al sitio, además debe obtener información de estudios previos implementados en el lugar de estudio (Ministerio del Ambiente, 2014, p.10).

1.2.6.1. Tipos de muestreos de suelos

El muestreo de suelos depende del análisis a realizar y del área a ser analizado, los análisis pueden ser físicos, químicos y microbiológicos y el área depende del cultivo implementado, zonas de conservación, sitios de contaminación, etc., el muestreo en áreas grandes se realiza en forma de X, cuadrícula y zigzag de forma aleatorio simple o estratificado, para ello, implementan el muestreo compuesto, sin embargo en áreas pequeñas o puntuales recolectan muestra en un tiempo y lugar específico denominado muestreo simple (Mendoza y Espinosa, 2017, p.19).

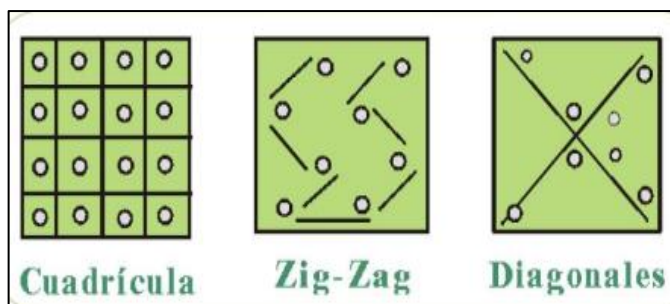


Figura 4-1. Formas de muestreo en parcelas

Fuente: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, [sin fecha].

1.2.6.2. Profundidad de muestreo del suelo

Las submuestras a extraer dependen del tamaño del área, es decir se puede extraer de 15-20 submuestras en un área de 10 ha, la cantidad representativa a ser llevada para el análisis comprende entre 0,5-1kg y dependiendo de la homogeneidad del terreno se puede dividir en diversas áreas de muestreo. La extracción se realiza a diferentes profundidades, dependiendo del tipo de vegetación, un muestreo general se puede realizar entre 2-20cm donde se puede encontrar gran cantidad de raíces, sin embargo, la vegetación con pasto se muestrea a una profundidad de 0-10 cm (IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi), 2022), 0-25 cm pastos de corte y cultivos comerciales como hortalizas, 25-50 cm especies forestales y frutales en general (Mendoza y Espinosa, 2017, pp.17-18).

1.2.6.3. Etiquetado, transporte y refrigeración de la muestra

Las muestras no deben contener agua y si fuera el caso debe secar por 12h a aire libre sobre una funda plástica, posteriormente eliminar impureza (Biurrun, 2016, p. 4). Colocar en funda ziploc evitando dejar aire en el interior, colocar la etiqueta y refrigerar entre 4-6°C, en caso de conservar por un periodo largo se debe dejar la muestra a temperatura ambiente por un día antes de cualquier análisis (Mendoza y Espinosa, 2017, pp.17-18).

N° de Muestra:	_____
Nombre propietario	_____
Ubicación del Muestreo	_____
Fecha de Muestreo	_____

Figura 5-1. Etiqueta de la muestra de suelo

Fuente: Biurrun, 2016.

1.2.7. Cultivo microbiano

Los microorganismos por su diversidad, por su condición y adaptabilidad requieren medios de cultivos específicos para cada tipo de microorganismo. Al medio de cultivo se puede definir como el conjunto de nutrientes que crean las condiciones óptimas para el desarrollo de los microorganismos, debido que sirve como soporte y obtención de nutrientes para su crecimiento (Manacorda, Cuadros y Alvarez, 2007).

1.2.7.1. Tipos de medios de cultivos

La variedad de los medios de cultivo se debe a la diversidad metabólica de los microorganismos, por ello (Gamazo, López y Díaz, 2005, pp. 8-9) lo clasifican en:

- Medios generales que permite el crecimiento de una gran variedad de microorganismos
- Medios de enriquecimiento que favorece un tipo de microorganismo sin la inhibición total de los demás microorganismos
- Medios selectivos que permite el crecimiento de un solo tipo de microorganismos con la inhibición total del resto
- Medios diferenciales utilizan las condiciones específicas de un tipo de microorganismos.

Los medios de cultivos usualmente contienen fuente de carbono y sales, agar, peptonas, extractos, sistemas amortiguadores, fluidos corporales, agentes selectivos, indicadores de pH, agentes reductores como sus principales constituyentes (Gamazo, López y Díaz, 2005, pp. 9-11).

1.2.7.2. Recuento de microorganismos en placa

La siembra microbiológica en cajas Petri para el conteo de UFC contenidas en una muestra de suelo se pueden realizar de dos maneras, como se detalla a continuación (Cerra et al., 2013, p.4):

- Por diseminación: El inóculo se dispone sobre el agar gelificado, puede ser de 0,1-0,2 ml, la misma que es esparcida con asa de driglaski por toda la superficie del agar, empleando la técnica de siembra por extensión.
- En profundidad: se coloca el inóculo de 1ml sobre la caja Petri, posteriormente se coloca el agar a 45°C, finalmente se remueve en forma de ocho para que se mezcle completamente el inóculo y dejar solidificar boca arriba (técnica de vertido en placa).

Los cultivos se siembran a temperaturas óptimas y tiempo determinado, según el tipo de microorganismo a obtener, posterior a ello las colonias de cada una de las cajas se contabilizan y mediante la siguiente fórmula se determina la UFC/ml o UFC/g (Madigan et al., 2009):

$$\frac{UFC}{ml} o \frac{UFC}{g} = cc * fd * \frac{1}{Vi}$$

Donde:

UFC: unidades formadoras de colonias

Cc: Colonias contadas

fd: Factor de dilución (inversa de la dilución)

Vi: Volumen del inóculo (0,1ml)

1.2.8. Microorganismos productores de electricidad

Los microorganismos que desempeñan la función de degradadora de la materia orgánica y producción de electricidad son diversos, la diversidad y la población bacteriana existente en cada zona depende de las condiciones climáticas y características fisicoquímicas del suelo, diversos autores han designado a los microorganismos que oxidan la materia orgánica y transfieren electrones como electrógenos, anodófilos, exoelectrógenos, bacterias electroquímicamente activas, etc., de acuerdo a la función que cumplen en cada electrodo. Las bacterias identificadas en la generación de bioelectricidad son: *Pseudomonas aeruginosa*, *Shewanella putrefaciens IR-1*, *Escherichia coli*, *Clostridium butyricum Eg3*, *Geobacter sulfurreducens*, *Desulfuromonas acetoxidans*, *Desulfobulbus propionicus*, *Geobacter metallireducens* y *Rhodospirillum rubrum*, *A3 (Aeromonas hydrophila)*, estos microorganismos se caracterizan por generar la eficiencia coulombica superior al 90% con respecto a los microorganismos fermentadores (Khudzari, 2018, pp. 11-12).

1.2.9. Polarización y potencia

La polarización estima la potencia más alta y la resistencia interna que sale del sistema de PMFC, mediante los datos de voltaje y resistencia externa se puede obtener la curva de polarización y la curva de densidad de potencia (Khudzari, 2018, pp. 11-12). La curva de polarización se halla con la variable voltaje vs corriente y esta determina tres zonas de cambio como es la óhmica (relación lineal entre corriente y voltaje), pseudomeseta (la corriente es independiente del voltaje) y electroconvección (nuevamente se mantiene una relación lineal) (Torres et al., 2019, p. 6-15), mientras que la curva de potencia se grafica con la variable densidad de potencia vs corriente, los cálculos se realizan mediante las fórmulas descritas a continuación (Moqsud, M. A. et al., 2015, p. 64), (Sophia y Sreeja, 2017, p. 64).

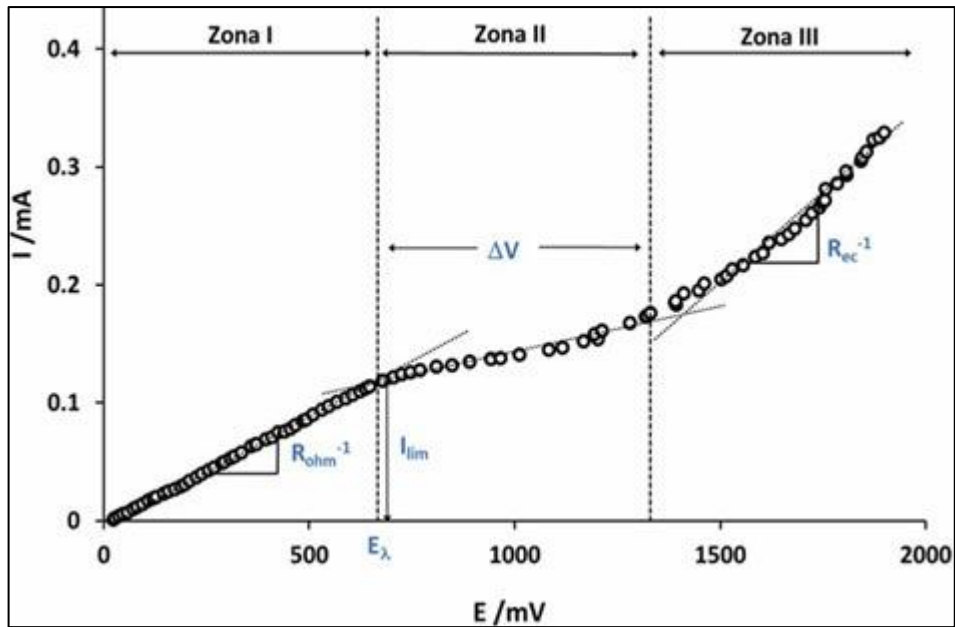


Figura 2-1. Característica de una curva de polarización

Fuente: Torres et al., (2019).

- Densidad de potencia

$$P_d = \frac{V^2}{a * R}$$

Donde:

P_d : Densidad de potencia (W/m²)

V: voltaje (voltios)

a: área del ánodo (m²)

R: Resistencia externa (ohmios)

CAPÍTULO II

2. MARCO METODOLÓGICO

2.1. Localización del estudio

Las estaciones meteorológicas pertenecientes a GEAA-ESPOCH se encuentran ubicada en distintos puntos estratégicos de la provincia de Chimborazo, las celdas de combustible microbiano tipo planta fueron implementadas en cuatro estaciones meteorológicas: Multitud, Atillo, Aña Moyocancha y San Juan a una altitud de 1483, 3467, 3822 y 3232 msnm, respectivamente, el clima predominante a una altura de 3000-4000 msnm es de tipo glacial, representada como paramo, y clima meso térmico semi-humedo y húmedo cercana a las costas del mar (Haro et al., 2020, p. 27).

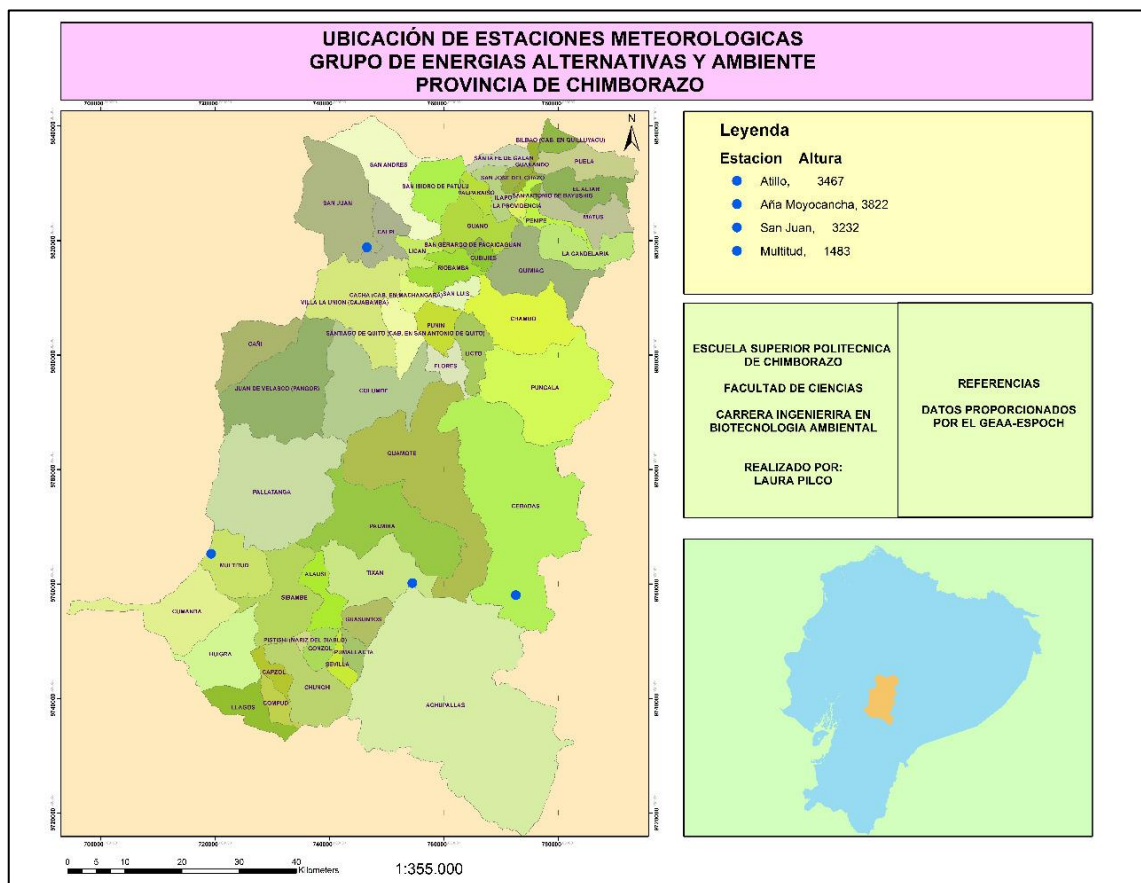


Gráfico 1-2. Ubicación de las estaciones meteorológicas.

Realizado por: Pilco Laura, 2021.

Las coordenadas de cada estación meteorológica detalladas en la siguiente tabla, están en UTM 17 Sur.

Tabla 1-2. Coordenadas de las estaciones meteorológicas

Estación meteorológica	Longitud	Latitud
Aña Moyocancha	754523,1329	9760160,704
Multitud	725681	9764904
San Juan	746596	9818849
Atillo	772610	9758048

Fuente: GEAA, 2021.

Realizado por: Pilco Laura, 2021.

2.2. Unidad de análisis

La unidad de análisis en la investigación fue la celda de combustible microbiano tipo planta, la misma que contiene planta, ánodo y cátodo (fibra de carbono), aislante (tubo de cerámica), sustrato (suelo), expuestas a las condiciones atmosféricas de cada localidad.

2.3. Población de estudio

La población de estudio para la generación de bioelectricidad mediante celdas de combustible microbiana tipo planta en las estaciones meteorológicas fue la planta abundante de cada estación meteorológica perteneciente a las localidades de Atillo y San Juan, Multitud y Aña Moyocancha.

2.4. Tamaño de la muestra

La muestra implementada en las celdas de combustible microbiano tipo planta para la generación de electricidad fue la planta abundante de cada una de las estaciones meteorológicas, dichas plantas fueron dispuestas entre 5-9 en cada celda de combustible microbiano tipo planta.

2.5. Técnicas de recolección de datos

La recolección de datos se realizó mediante la técnica observacional que fue de manera automática mediante un dispositivo de recolección de datos.

2.6. Tipo y Diseño de la investigación

2.6.1. Tipo de investigación

La evaluación de bioelectricidad mediante el uso de celdas de combustible microbiana tipo planta se especificó por el método de investigación cuantitativa, según el objetivo se consideró aplicativa debido a que se implementó en cada estación meteorológica, según el nivel de profundización en el objeto de estudio fue explicativa porque se pretendió explicar la generación de bioelectricidad a diferentes condiciones climáticas y con una planta predominante de cada estación meteorológica, según la manipulación de variables fue no experimental, debido a que no se manipula las variables independientes, según el tipo de inferencia se consideró hipotético-deductiva por lo se relacionó la generación de bioelectricidad con la radiación solar directa, temperatura de suelo (-10cm) y temperatura ambiental, según el periodo temporal fue transversal, ya que el análisis de la variable respuesta se realizó en un periodo determinado (Hernández, Collado y Baptista, 2014).

2.6.2. Diseño de investigación

La investigación se consideró como no experimental, debido a que no se manipulan variables meteorológicas (radiación solar, temperatura ambiental y temperatura del suelo), para obtener la bioelectricidad (Hernández, Collado y Baptista, 2014).

2.7. Identificación de variables e hipótesis

2.7.1. Identificación de variables

La investigación identifica la generación de bioelectricidad como la variable dependiente y a la radiación solar, temperatura ambiental, temperatura de suelo, plantas predominantes de cada zona y variabilidad de la población microbiana como las variables independientes.

2.7.2. Hipótesis

Las celdas de combustible microbianas tipo plantas ubicadas en las estaciones meteorológicas de Aña Moyocancha, Multitud, Atillo y San Juan son generadores potenciales de bioelectricidad.

La producción de bioelectricidad se relaciona con las variables meteorológicas: temperatura ambiente, temperatura de suelo y radiación solar directa en cada una de los puntos seleccionados para evaluar.

2.8. Etapas de la investigación

El estudio tiene como objetivo principal evaluar la generación de electricidad de las celdas de combustible microbiana tipo planta que se implantó dentro de las estaciones meteorológicas ubicadas en Aña Moyocancha, Multitud, Atillo y San Juan, para ello se siguieron diversas etapas que se detallan a continuación.

2.8.1. Diversidad vegetal en las estaciones meteorológicas

2.8.1.1. Materiales y equipos implementados en campo

Tabla 2-2. Materiales y equipos para determinar la diversidad vegetal.

MATERIALES Y EQUIPOS		
Actividad	Material	Cantidad
Conteo de la vegetación presente en cada zona de estudio	Palos de escoba de 25cm de alto	5
	Piola de 8m	1
	Metro	1
	Libreta	1
	Guantes	1
Recolección de los ejemplares	Funda ziploc	26
	Etiquetas	26
	Formulario de descripción	4
Prensado de los ejemplares	Cartón corrugado de 35x35 cm	24
	Papel periódico de 35x35 cm	40
	Papel absorbente (rollo)	8
	Esponja de 35x35 cm	4
	Pilo de libros	1
Identificación de cada ejemplar	Carpeta	1
	Herbario de la ESPOCH	1

Realizado por: Pilco Laura, 2022.

2.8.1.2. Selección de la planta

Dentro de la estación meteorológica de Atillo, San Juan, Aña Moyocancha y Multitud se realizó un muestreo aleatorio con el fin de determinar la unidad muestral o parcela fija de $1m^2$, la misma que fue delimitada con piola de 8m y cuatro palos de escoba de 25cm de alto, para facilitar el conteo se dividió de forma diagonal de esquina a esquina, en dichas divisiones se contabilizó plantas de gran tamaño, mientras que para el conteo de plantas pequeñas se trazó un área de 625 cm^2 , la misma que se proyectó para el área de $1m^2$ y mediante el cálculo de la abundancia relativa de cada especie encontrada se escogió la planta predominante en cada sitio de estudio como se muestra en la figura 2-2. Para ello se basó en el método de las “Parcelas Modificadas de Whittaker” y área mínima de muestreo para herbazales, las mismas que facilitaron el trabajo en campo para contabilizar especies de pastizales, arbustivas de cada sitio de estudio (Ministerio de Ambiente, 2015, pp.20-25).

2.8.1.3. Recolección, prensado e Identificación de la planta

Para proceder a recolectar las muestras se llenó el formulario de registro de información a campo en cada una de las estaciones meteorológicas (Atillo, San Juan, Aña Moyocancha y Multitud), posteriormente en cada una de ellas se recolectaron diversas especies de plantas por triplicado con sus respectivas partes: raíz, hojas, flores y frutos, cada tipo de ejemplar extraído fue colocado en una funda plástica de polietileno (Ziploc) con su respectiva etiqueta, los ejemplares se conservaron en fundas cerradas herméticamente hasta proceder con su respectivo prensado como se muestra en la figura 2-2. La recolección de cada ejemplar se basó en la Técnica de Recolecta de Plantas y Herborización propuesto por Sánchez, para lo cual se escogió plantas jóvenes y libres de daños físicos e insectos (Sánchez y González, 2007, p. 123-133).

El prensado consistió en colocar un cartón corrugado, papel absorbente, papel periódico, muestra de la planta, papel periódico, papel absorbente, cartón corrugado y así sucesivamente hasta colocar todos los ejemplares, la separación de muestras de cada localidad se realizó colocando una esponja de 5cm de grosor sobre el cartón prensado y sobre ella se colocaron un pilo de libros de acuerdo a la especificación del manual de recolección y prensado (Jaramillo, Peña y Aguirre, 2020). Los ejemplares fueron colocados sobre el papel periódico de forma esparcida con sus hojas aplanadas de manera que se observe el haz y el envés de cada hoja y las flores de cada ejemplar se colocaron de manera abierta, los pastizales grandes se colocaron dobladas en forma de N y circulares, además, al extremo inferior derecho del papel periódico se colocó su respectiva etiqueta, posterior a 24h del prensado se revisó el estado de la muestra y se procedió con el cambio del papel absorbente por uno nuevo todos los días con una duración de 15 días y posterior a ello

se cambió pasando dos días por una semana, hasta asegurar que los ejemplares no contengan la humedad, para ello se basó en Manual de Recolección de Plantas y su Herborización (Cires, 2012).

Los ejemplares secos fueron llevados al herbario de la ESPOCH con su respectivo formulario de registro de información a campo, en el cual, se procedió a identificar por familias a cada ejemplar, posteriormente, se buscó la especie perteneciente a los ejemplares de acuerdo a su familia, la identificación se realizó de forma observacional basándose en las formas y bordes de las hojas, color y forma de las flores, tipo de tallo y raíz, etc., como se muestra en la figura 2-2.



Figura 3-2. Procedimiento de selección de planta para la PMFC

Realizado por: Pilco Laura, 2022.

2.8.2. Población microbiana del suelo

Los pasos detallados a continuación se realizaron al principio de la implementación de las PMFC y al dar por culminado la recolección de datos en cada una de las estaciones.

2.8.2.1. Materiales, equipos y reactivos

Tabla 3-2. Materiales, equipos y reactivos necesarios para el conteo de microorganismos.

MATERIALES PARA EL MUESTREO		
Actividad	Materiales	Cantidad
Recolección de la muestra de suelo	Azadilla	1
	Funda ziploc	4

		Etiquetas	4
		Metro en cm	1
		Guantes de látex	4
		Cooler	1
		Refrigerador a 5°C	1
EQUIPOS Y REACTIVOS			
Sustancias	Materiales	Reactivos	Equipos
Agua destilada	Tubos de ensayo de 10ml	Peptona	Balanza analítica
Alcohol	Cajas Petri de 36ml	Agar nutritivo	Autoclave
	Erlenmeyer de 1000 y 250 ml		Mechero de alcohol
	Puntas de micropipeta		Incubadora
	Papel aluminio		Cámara de bioseguridad
	Algodón		Calculadora
	Gasa		
	Espátula		
	Asa de Drigalski		
	Libreta		
	Cinta masquen		
	Rotulador permanente		
	Papel absorbente		

Realizado por: Pilco Laura, 2022.

2.8.2.2. *Recolección de la muestra de suelo*

La recolección de la muestra de suelo se basó en la “Guía de Muestreo” y “Guía Técnica para Muestreo de Suelos” (IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi), 2022), (Mendoza y Espinosa, 2017). En cada estación meteorológica se realizó un muestreo simple, para ello, con la ayuda de una azadilla se cavó un hoyo de 25x25 cm de largo y ancho con profundidad de 10 cm, del cual se eliminó 2cm de la capa superior del suelo y posteriormente se procedió a recolectar aproximadamente 250 g de muestra en funda ziploc debidamente etiquetado. La muestra fue trasladada en un cooler hasta el laboratorio de Biología Molecular y genética de la Facultad de Ciencias, las muestras se conservaron en refrigeración a 5°C (almacenamiento por periodos cortos) hasta el momento del cultivo microbiológico.



Figura 4-2. Proceso de extracción, transporte y almacenamiento de las muestras de suelos.

Realizado por: Pilco Laura, 2022.

2.8.2.3. Preparación de medios de cultivo

Los materiales fueron lavados con agua, jabón, enjuagados con agua destilada y secados con papel absorbente. Las cajas Petri se colocaron en bolsas de tela y las puntas de la micro pipeta se colocaron en un vaso de precipitación de 250 ml cubierta con papel aluminio para su posterior autoclave, metodología implementada de la Guía de Laboratorio de Microbiología Ambiental («Microbiología Ambiental» 2020). Posteriormente se preparó el agua de peptona para cada una de las muestras de suelo, según las indicaciones de la etiqueta (0,1 g en 100 ml), para ello se multiplicó 9 ml para 5 diluciones, a la respuesta se sumó 90 ml, obteniendo 135 ml, y 0,14 g de peptona a utilizar para cada solución, la peptona fue colocado en el Erlenmeyer de 250 ml aforado hasta 135 ml con agua destilada, se removió por 5 minutos hasta obtener una solución homogénea, dicha solución se transfirió 9ml a 5 tubos, el proceso se repite para todas las soluciones; el agar nutritivo se preparó según las especificaciones de la etiqueta (23 g en 1000 ml), la solución se preparó en un Erlenmeyer de 1000 ml, para ello se multiplico 32 cajas Petri por 20 ml, obteniendo 640 ml y 14,72 g de agar nutritivo, dicha cantidad se colocó en el Erlenmeyer aforado a 640 ml, la mezcla se removió por 5 minutos aproximadamente hasta obtener una solución homogénea, para ello se basó en el Manual de Microbiología I (Gutiérrez et al., 2020).

Se construyeron 4 torundas para la solución de peptona y 1 torunda para el agar nutritivo con algodón y gasa, estas fueron colocados en la boca de las soluciones y sobre ellas se colocó papel aluminio, además se colocaron las tapas en los tubos de ensayo de 10 ml. Las soluciones preparadas en conjunto con las cajas Petri y puntas de micro pipeta fueron auto clavados a 115°C por un lapso de 15 minutos en autoclave del laboratorio (código EI/M/01), posteriormente fueron retirados y colocados en refrigeración a 5°C todo el material esterilizado, el agar nutritivo fue plaqueado caliente en la cámara de bioseguridad (S@feFlow 0.9), una vez fríos fueron colocados boca abajo en el refrigerador hasta su respectiva siembra microbiológica, el proceso se realizó

siguiendo la metodología de la Guía de Actividades Prácticas Microbiología-Agrícola (Cordoba, 2015, pp. 18-19).

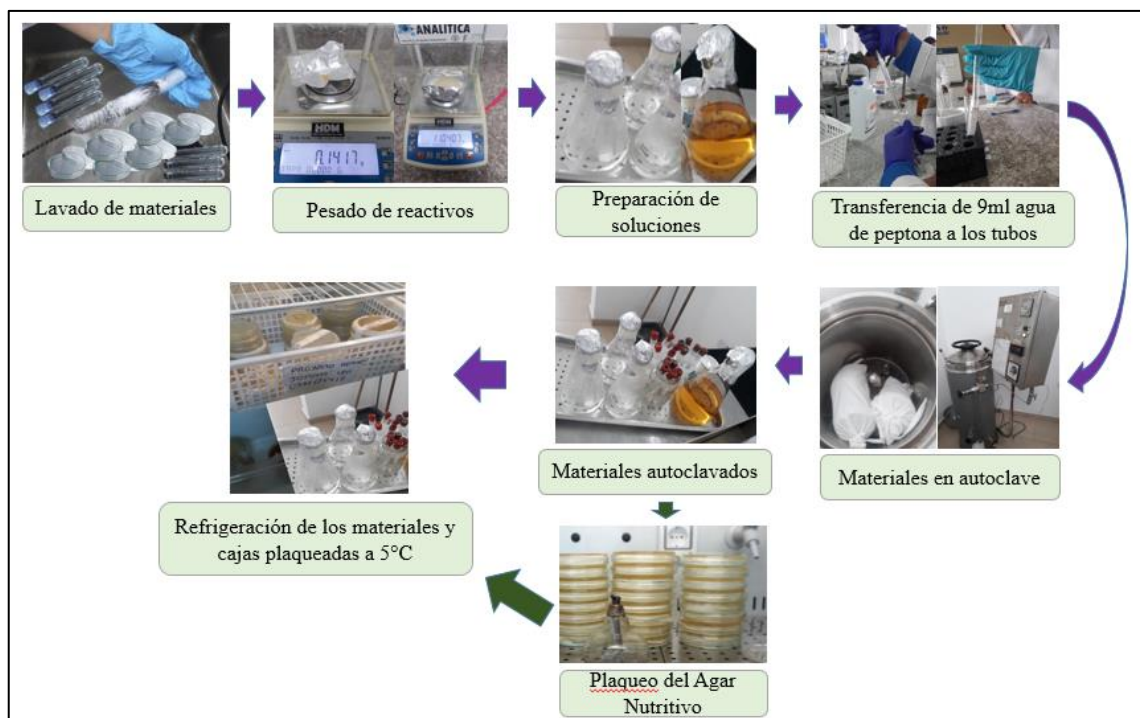


Figura 5-2. Preparación de soluciones peptonadas, medios de cultivo y su refrigeración.

Realizado por: Pilco Laura, 2022.

2.8.2.4. Cultivo microbiológico

La muestra de suelo de Atillo, San Juan, Multitud y Aña Moyocancha denotadas como M1, M2, M3 y M4 respectivamente, se pesó 10 g de cada uno y se colocó en 90 ml de solución de peptona, estas fueron removidas constantemente durante 15 minutos en dirección de las manecillas de reloj y viceversa, posteriormente se dejó reposar por 5 minutos, después de su reposo se extrajo una alícuota de 1 ml de la solución 10^{-1} (solución madre) y se colocó en solución peptonada de 10^{-2} , posterior a la agitación se transfirió 1 ml a la solución peptonada de 10^{-3} y así sucesivamente hasta la solución peptonada de 10^{-6} , para ello se basó en la Técnica de diluciones seriadas (Logroño, 2014, pp. 26-27). La siembra se dio a cabo en la cámara de bioseguridad (S@feFlow 0.9) mediante la técnica de siembra por extensión, para ello se extrajo una alícuota de 0,1 ml de las diluciones peptonadas de 10^{-3} , 10^{-4} , 10^{-5} y 10^{-6} , las mismas que fueron colocadas de manera duplicada en el agar nutritivo gelificado y extendido con aza de Driglaski basado en la Guía de Actividades Prácticas Microbiología-Agrícola (Cordoba, 2015, pp. 18-19), los cultivos fueron incubados boca abajo en la incubadora a $24 \pm 1^\circ\text{C}$ durante 3 días basados en la metodología utilizada para el análisis microbiano de suelos de paramo (Cárdenas, 2015).

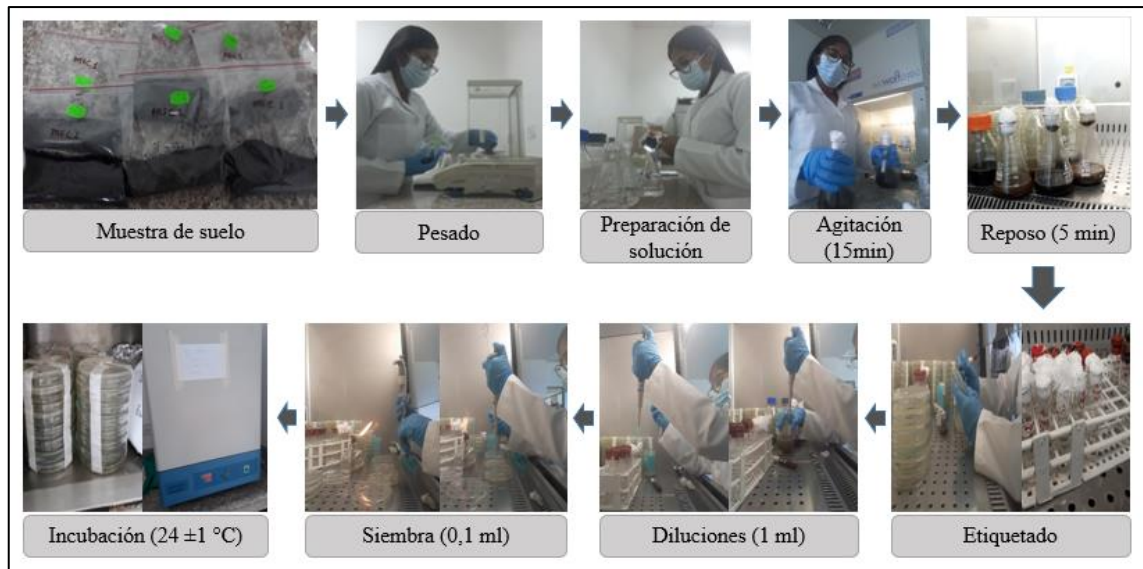


Figura 6-2. Proceso de las diluciones de la muestra de suelo y cultivo de las diluciones de 10^{-3} hasta 10^{-6} por duplicado.

Realizado por: Pilco Laura, 2022.

2.8.2.5. *Conteo microbiológico*

Las cajas Petri que presentaron abundante crecimiento se trazó cuadrantes iguales, del cual, se contabilizó un cuadrante y posteriormente se multiplicó por 4 para obtener la cantidad real de colonias, mientras que las cajas con poco crecimiento se contabilizaron de manera observacional, además se observó las características que poseían las colonias presentes en cada una de las cajas. Los datos obtenidos fueron tabulados en Excel y se trabajó con los promedios de cada muestra para el recuento de UFC/ml (Unidades Formadoras de Colonia), (Cordoba, 2015, p. 36).



Figura 7-2. Contabilización de los microorganismos.

Realizado por: Pilco Laura, 2022.

2.8.3. Diseño e implementación de las PMFC

2.8.3.1. Equipos, sustancias y materiales

Tabla 4-2. Equipos, sustancias y materiales para el diseño e implementación de las PMFCs.

MATERIALES DEL LABORATORIO		
Materiales	Sustancias	Equipos
Fibra de carbono	Agua destilada	Horno
Bandeja de aluminio		
MATERIALES PARA EL CAMPO		
Actividad	Materiales	Cantidad
Armado de las PMFC	Tubos de 20cm con Ø:3in	24
	Codos de Ø:3in	16
	Tubos de barro	12
	Alambre de ortodoxia N°9 (m)	8
	Taype	1
	Malla verde plástica (m ²)	1
	Macetas	4
Implementación en campo	Cables (m)	8
	Alicate	1
	Datalogger	4

Realizado por: Pilco Laura, 2022.

2.8.3.2. Pretratamiento, armado e implementación de los PMFCs

La fibra de carbono que se utilizó como ánodo y cátodo fueron de 18 * 30 cm y 18 * 23 cm respectivamente, las mismas fueron tratadas con agua destilada por 24h y llevada a la mufla a 500 °C por 2 h; los tubos de barro se enviaron a fabricar con las siguientes dimensiones: 18 cm de alto, 1 cm de grosor y 7,5 cm de diámetro interior; el acabado brillante de la superficie interna y externa de los tubos fueron retirados con lija de 30 hasta obtener una superficie rugosa, este tipo de tratamiento se realizó antes del armado (Kiran et al., 2020, p. 270-281). En el armado de las PMFCs, los tubos de barro fueron recubiertos por el ánodo de 18 cm de ancho y cátodo de 30 cm de largo, en la superficie externa del tubo se sujetó los extremos con la cinta y en la mitad se conectó al alambre de ortodoxia de 60 cm de largo, mientras que por el interior del tubo se colocó el cátodo

de 18 cm de ancho y 23 cm de largo tejido con 30 cm de alambre de ortodoxia sujetas por la malla verde de plástico de 15 cm de alto por 25 cm de ancho, ocho de ellos fueron armados con codos de PVC envueltos con malla verde de 8 cm de largo y 4 cm de ancho en sus extremos, los mismos que fueron conectados con tubos de PVC de 20 cm de alto, mientras que los cuatro restantes se colocaron en las macetas que fueron perforadas de manera horizontal a una altura de 5cm desde la base, el tubo de barro se colocó de manera horizontal dentro de la maceta unido a sus extremos con tubos de PVC de 20 cm de largo, procurando dejar la conexión del cátodo sobre el tubo de PVC.

La implementación de las PMFC en la estación meteorológica de Atillo, San Juan, Multitud y Aña Moyocancha se realizó el 07/12/2021, 08/12/2021, 10/12/2021 y 22/12/2021 respectivamente, en cada lugar de estudio se implementó 2 prototipos directamente en el suelo y uno en la maceta; en el suelo se cabó un hoyo de 75 * 40 cm (largo y ancho) en la cual se colocó dos prototipos de forma horizontal a una profundidad aproximada de 20 cm con separación de 25 cm entre los dos prototipos, sobre cada ánodo se sembraron plantas seleccionadas de acuerdo a la abundancia relativa de cada estación meteorológica y en los extremos de los tubos de PVC se colocaron funda Siploc para evitar el ingreso de la lluvia. En el prototipo de maceta se colocó suelo de la misma estación y la misma planta seleccionada, el tubo de PVC se dejó con abertura directa en los extremos. Las conexiones al recolector de datos casero de la producción de bioelectricidad se realizaron posterior a la adaptación de los ejemplares en PMFCs el 18/04/2022 hasta 03/05/2022 en Atillo-San Juan, y el 07/05/2022 hasta 22/05/2022 en Multitud y Aña Moyocancha.



Figura 8-2. Proceso de diseño e implementación de las PMFCs en las estaciones meteorológicas.

Realizado por: Pilco Laura, 2022.

2.8.4. Recolección y análisis de datos

2.8.4.1. Recolección de datos de la generación de bioelectricidad

En la estación meteorológica de Atillo la PMFC se conectó directo al Datalogger de la marca Vaisala el 07/12/2021 (día de la implementación de PMFC), la cual fue programada para que recolecte la producción de bioelectricidad en voltios hasta el 26/03/2022, finalmente, para corroborar los datos obtenidos de la estación se construyó un recolector de datos independiente.

Las conexiones de las celdas de combustible microbiano tipo planta se realizaron posterior a la adaptación de las plantas, para ello se construyó dos recolectores de datos que fueron implementadas primero en San Juan y Atillo durante 15 días, transcurrido el tiempo se retiró y se llevó a implementar en Multitud y Aña Moyocancha por el mismo lapso de tiempo. La programación del aparato se realizó con el programa LED MINI (Arduino 1.8.19) y el esquema del recolector de datos se especifica en el anexo N.

2.8.4.2. Análisis de Datos

De la información recolectada por cada una de las celdas de combustible microbiano tipo planta implementadas, se procedió a realizar un análisis descriptivo (media, mediana, máximos y mínimos), esto con el fin de verificar su comportamiento en función del tiempo y su respectivo gráfico, para hallar dichos resultados se trabajó con los promedios horarios de los datos (24 h). La curva de polarización se obtiene al graficar la corriente vs. el voltaje, mientras que la curva de potencia se halla calculando densidad de potencia, de modo que, en eje de las abscisas (X) representa el valor de la corriente obtenida de las PMFCs y el valor de la ordenada (Y) se incluye el voltaje para representar polarización, y densidad de potencia que determina la curva de potencia. Para conocer la dependencia entre las variables temperatura ambiente, temperatura de suelo a 10 cm de profundidad y radiación solar directa, con la producción de voltaje y corriente, se aplicó el test de correlación, según el resultado de la prueba de normalidad. Sabiendo que, si este supuesto es afirmativo se cuantificará la correlación de Pearson, mientras que sea rechazada este condicional se tomará en cuenta la magnitud de asociación mediante el coeficiente de Spearman. Los resultados obtenidos fueron puestos a discusión empleando investigaciones realizadas por otros autores.

CAPÍTULO III

3. MARCO DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

3.1. Resultados

3.1.1. Selección de la planta

En el área de 1m² se encontraron gran diversidad vegetal en cada estación meteorológica y mediante la aplicación de la fórmula de abundancia relativa se seleccionó la especie a implementar en las PMFCs de cada estación meteorológica.

Tabla 5-3. Ejemplares de Atillo

Nombre Científico	Nombre Común	Cantidad	Ar
<i>Taraxacum officinalis</i> L.	Taraxaco	37	13,81%
<i>Bromus canthanticus</i>	Cebadilla	47	17,54%
<i>Trifolium repens</i> L.	Trébol blanco	64	23,88%
<i>Geranium laxicaule</i> R. Knath	N.E	112	41,79%
<i>Drymaria cordata</i> (L.) willd ex schult	Hierba de estrella	3	1,12%
<i>Azorella pedunculata</i> (Spreng)	Almohadillas de páramo	4	1,49%
<i>Poligonixomi aviculare</i>	Lengua de pájaro	1	0,37%
Total		268	100,00%

Fuente: Herbario ESPOCH, 2022, (Coladonato, 1993), (HerbariVirtual, 2022), (Pl@ntNet, 2014).

Realizado por: Pilco Laura, 2022.

La tabla 5-3, muestra los resultados obtenidos del conteo de la población vegetal existentes en un área de 1m², ubicada en la estación meteorológica de Atillo a una altura de 3467 msnm, se encontraron siete especies de plantas diferentes entre sí, con un total de la población de 268 plantas en 1m². El ejemplar más abundante del sitio de muestreo fue *Geranium laxicaule* R. Knath con abundancia relativa (Ar) de 41,79%, la misma que representó un alto porcentaje al respecto de las demás especies existentes en el sitio de estudio, dicha planta fue implementada en la PMFC1, PMFC2 y PMFC3 para la evaluación de la generación de bioelectricidad.

Tabla 6-3. Ejemplares de San Juan

Nombre Científico	Nombre Común	Cantidad	Ar
<i>Sonchus oleraceus</i>	Cerrojo común	39	29,10%
<i>Frodium moschatun</i>	Alfiler	52	38,81%

<i>Bromus cantharticus</i>	Bromus	30	22,39%
<i>Conyza Horibunda H.B.K.</i>	Yahuachi	2	1,49%
<i>Polycarpon tetraphyllum</i>	Jabonera de camino	8	5,97%
<i>Taraxacum officinalis L.</i>	Taraxaco	3	2,24%
Total		134	100,00%

Fuente: Herbario ESPOCH, 2022, (Canarias, 2022).

Realizado por: Pilco Laura, 2022.

La tabla 6-3, contiene los resultados encontrados de la población de plantas coexistentes en $1m^2$ de la estación meteorológica de San Juan, ubicada a una altura de 3232 msnm, en tal área se encontró 134 ejemplares pertenecientes a 6 especies de plantas, la especie más abundante del área de muestreo fue *Frodium moschatun*, conocido como la planta alfiler con Ar de 38,81% al respecto de los demás ejemplares presentes, la misma que fue implementada en la PMFC1, PMFC2 y PMFC3 para la generación de la bioelectricidad.

Tabla 7-3. Ejemplares de Multitud

Nombre Científico	Nombre Común	Cantidad	Ar
<i>Cyperus</i>	Cyperus	23	27,71%
<i>Eragrostis albus</i>	Eragrostis blanco	14	16,87%
<i>Taraxacum officinalis L.</i>	Taraxaco	2	2,41%
<i>Ageratina azagaroensis</i>	Marmaquilla	2	2,41%
<i>Hyptis eriocephala</i>	Poleo Azul	2	2,41%
<i>Paspalum conjugatum</i>	Orqueta	34	40,96%
<i>Gallinsoga</i>	Soldado gigante	2	2,41%
<i>Gamochoeta spicatum</i>	Vira vira	4	4,82%
Total		83	100,00%

Fuente: Herbario ESPOCH, 2022, (Ulloa, 2006), (UETMM, 2020).

Realizado por: Pilco Laura, 2022.

La tabla 7-3, presenta ocho especies de plantas que se sitúan en un área de $1m^2$ de la estación meteorológica de Multitud, la misma que se encuentra situada a una altura de 1483 msnm, en un área tan pequeña se encontró un total de población de 83 plantas, el ejemplar más abundante del lugar de muestreo fue *Paspalum conjugatum*, conocido como la orqueta con Ar de 40,96%.

Tabla 8-3. Ejemplares de Aña Moyocancha

Nombre Científico	Nombre Común	Cantidad	Ar
<i>Nassella tenuissima</i>	Pajonal	4	9,30%

<i>Taraxacum officinalis L.</i>	Taraxaco	10	23,26%
<i>Holcus lanatus L.</i>	Holco	14	32,56%
<i>Mypochaeris sessiliflora</i>	Achicoria blanca	3	6,98%
<i>Geranium laxicaule R. Knath</i>	N.E	8	18,60%
<i>Muhlebergia angustata</i>	Pasto orchoro	4	9,30%
Total		43	100,00%

Fuente: Herbario ESPOCH, 2022 (UETMM, 2017).

Realizado por: Pilco Laura, 2022.

La tabla 8-3, muestra los resultados encontrados del conteo de la vegetación existente en $1m^2$, se encontró un total de 43 plantas pertenecientes a 6 especies de plantas, la más abundante fue la especie de *Holcus lanatus L.*, conocido como holco, la misma que se utilizó en la implementación de las PMFCs de la estación meteorológica de Aña Moyocancha, situada a 3822 msnm.

3.1.2. Implementación de la celda de combustible microbiano tipo planta

En las instalaciones del grupo GEAA se realizó el armado de 12 prototipos de PMFC, de los cuales, 8 de ellos fueron designados para su implementación en el suelo y 4 para la implementación en las macetas. En las estaciones meteorológicas de Atillo, San Juan, Multitud y Aña Moyocancha se implementaron 2 PMFC en el suelo y una en maceta, se colocaron en cada una de ellas 5-9 plantas. En Atillo se colocó 15 plantas de *Geranium laxicaule*, en San Juan se implementó 21 plantas de *Frodium moschatun*, en Multitud se sembró 18 plantas de *Paspalum conjugatu*, en Aña Moyocancha se cultivó 27 plantas de *Holcus lanatus L.*, en cada una de las PMFCs se colocaron 5, 7, 6 y 9 plantas respectivamente como se muestra en la figura 8-3.



Figura 9-3. Implementación de las PMFCs con los ejemplares abundantes de cada estación meteorológica.

Realizado por: Pilco Laura, 2022.

En la visita realizada posterior a tres meses de implementación, en San Juan y Atillo las plantas de las PMFCs se habían marchitado, e incluso había empezado a salir nuevos brotes, mientras que, en Multitud y Aña Moyocancha estaban vivas y vigorosas. Las conexiones al recolector casero de datos de la producción de bioelectricidad se realizaron posterior a la adaptación de los ejemplares en los PMFCs.

3.1.3. Variabilidad microbiana en la etapa inicial y final de la implementación de PMFC

Las muestras fueron extraídas de la estación meteorológica al momento de implementar las PMFC de Atillo el 07/12/2021, de San Juan el 08/12/2021, de Multitud el 10/12/2021 y Aña Moyocancha el 22/12/2021 del área a implementar las PMFCs, aproximadamente 250g, las mismas que fueron procesadas y sembradas en el laboratorio de Biología Molecular y Genética, las muestras de Atillo(M1), San Juan (M2) y Multitud (M3) se cultivaron el 14/12/2021 y de Aña Moyocancha (M4) se cultivó el 04/01/2022, fueron incubados a $24\pm 1^{\circ}\text{C}$ por 72h obteniendo así los resultados que se detallan en la siguiente tabla.

Tabla 9-3. Población microbiana en la etapa inicial de la implementación de las PMFC.

Muestra	Población inicial (UFC/ml)				Total UFC/ml
	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	
M1	$1,06 * 10^6$	$4,20 * 10^6$	$5,00 * 10^6$	$1,50 * 10^7$	$6,31 * 10^6$
M2	$5,16 * 10^6$	$7,00 * 10^6$	$1,35 * 10^7$	$5,50 * 10^7$	$2,02 * 10^7$
M3	$1,56 * 10^6$	$5,90 * 10^6$	$2,70 * 10^7$	$5,00 * 10^7$	$2,11 * 10^7$
M4	$2,34 * 10^6$	$3,55 * 10^6$	$2,80 * 10^7$	$1,10 * 10^8$	$3,60 * 10^7$

Realizado por: Pilco Laura, 2022.

La tabla 9-3, muestra los resultados de las UFC/ml obtenidos en las diluciones de 10^{-3} hasta 10^{-6} , en la dilución 10^{-3} y 10^{-4} la estación meteorológica ubicada en San Juan presenta mayor población microbiana con respecto a las demás muestras con $5,16 * 10^6$ UFC/ml y $7,00 * 10^6$ UFC/ml respectivamente, en la dilución 10^{-5} y 10^{-6} la estación meteorológica de Aña Moyocancha presenta gran cantidad de microorganismos con respecto a las demás muestras con $2,80 * 10^7$ UFC/ml y $1,10 * 10^8$ UFC/ml respectivamente. Al hallar el promedio de las cuatro diluciones se denota mayor población microbiana en la estación meteorológica de Aña Moyocancha con $3,60 * 10^7$ UFC/ml, seguidas de forma descendente de $M3 > M2 > M1$. Las muestras para su respectivo cultivo se extrajeron la semana de abundante lluvia y vientos fuertes.

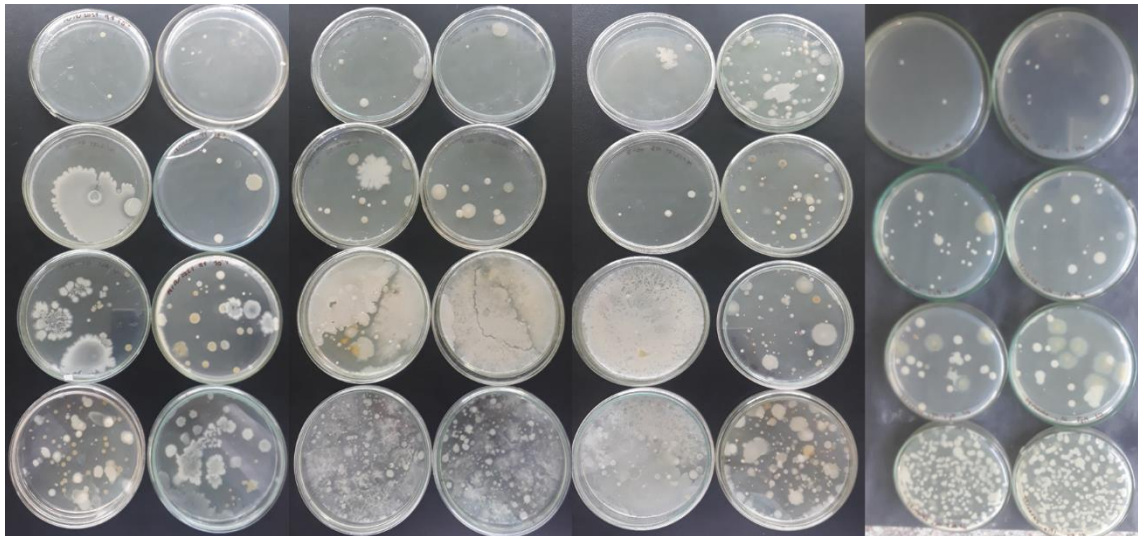


Figura 10-3. Cultivo de microorganismos de la dilución 10^{-3} hasta la 10^{-6} por duplicado de las muestras de M1, M2, M3, M4 respectivamente.

Realizado por: Pilco Laura, 2022.

Las morfologías de las colonias de microorganismos cultivadas desde la dilución 10^{-3} hasta 10^{-6} de las estaciones meteorológicas de Atillo, San Juan, Multitud y Aña Moyocancha presentan variabilidad en formas, bordes y superficie. En la figura 3-7, se observó que M1 contiene abundantes colonias de formas circulares, puntiformes e irregulares con bordes enteros lobulados, filamentosas y superficie plana, convexa de color cremoso, amarillo y anaranjado; en la M2 se observó gran cantidad de colonias filamentosos, rizoides e irregulares con bordes filamentosos, enteros y rizoide, con superficie plana y coloración blanquecina, cremosa, anaranjado y amarillenta; en la M3, se observó colonias filamentosos, rizoides, circulares e irregulares con bordes enteros, ondulados, rizoides y filamentosos, superficie plana y planoconvexa y coloración cremosa, amarillenta y anaranjado en abundancia; en la M4, se observó colonias puntiformes, circulares, irregulares con bordes enteros, ondulado y lobulado de coloración amarillentas, cremosos y un poco anaranjado en la mayoría de las cajas Petri.

Al finalizar la recolección de los datos de la producción de bioelectricidad en cada una de las estaciones meteorológicas se extrajo aproximadamente 250g de suelo de cada una de las PMFCs instaladas. La muestra de San Juan se extrajo el 05/05/2022, de Atillo el 07/05/2022, días con abundante lluvia y de Multitud y Aña Moyocancha el 02/06/2022, días sin presencia de precipitación, las mismas que fueron cultivadas el 06/05/2022, 09/05/2022 y 03/06/2022 respectivamente. Los cultivos microbiológicos fueron incubados a $24 \pm 1^\circ\text{C}$ por 72h, obteniendo así los siguientes resultados detallados a continuación.

Tabla 10-3. Población microbiana posterior a la recolección de datos de voltaje y corriente.

Estación meteorológica	Muestra	Población final (UFC/ml)				Total UFC/ml
		10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	
Atillo (M1)	PMFC1	$2,94 * 10^6$	$8,80 * 10^6$	$1,40 * 10^7$	$4,50 * 10^7$	$1,77 * 10^7$
	PMFC2	$3,16 * 10^6$	$8,35 * 10^6$	$1,10 * 10^7$	$1,00 * 10^7$	$8,13 * 10^6$
	PMFC3	$2,45 * 10^6$	$5,85 * 10^6$	$1,05 * 10^7$	$5,00 * 10^7$	$1,72 * 10^7$
San Juan (M2)	PMFC1	$7,94 * 10^6$	$1,53 * 10^7$	$7,55 * 10^7$	$7,50 * 10^7$	$4,34 * 10^7$
	PMFC2	$5,24 * 10^6$	$1,91 * 10^7$	$3,70 * 10^7$	$2,65 * 10^8$	$8,16 * 10^7$
	PMFC3	$4,54 * 10^6$	$2,38 * 10^7$	$4,75 * 10^7$	$2,20 * 10^8$	$7,39 * 10^7$
Multitud (M3)	PMFC1	$2,21 * 10^6$	$5,35 * 10^6$	$1,10 * 10^7$	$1,50 * 10^7$	$8,39 * 10^6$
	PMFC2	$1,83 * 10^6$	$6,85 * 10^6$	$2,97 * 10^7$	0,00	$9,54 * 10^6$
	PMFC3	$5,16 * 10^6$	$1,48 * 10^7$	$7,00 * 10^7$	$1,30 * 10^8$	$5,50 * 10^7$
Aña Moyocancha (M4)	PMFC1	$1,56 * 10^6$	$3,25 * 10^6$	$5,00 * 10^6$	0,00	$2,45 * 10^6$
	PMFC2	$1,31 * 10^6$	$3,30 * 10^6$	$4,50 * 10^6$	$1,00 * 10^7$	$4,78 * 10^6$
	PMFC3	$7,92 * 10^6$	$2,00 * 10^7$	$5,20 * 10^7$	$9,50 * 10^7$	$4,37 * 10^7$

Realizado por: Pilco Laura, 2022.

En la tabla 10-3, se detalla la población de los microorganismos presentes, posterior al transcurso de cuatro meses, en la dilución de 10^{-3} las PMFCs de M1 y M2 situadas en el suelo presentan mayor población microbiana con respecto a la de maceta, mientras que en M3 y M4, las macetas presentan gran población microbiana con respecto al PMFCs situadas en el suelo; en la dilución 10^{-4} $M2 > M4 > M3$ poseen gran cantidad de microorganismos en PMFCs ubicados en la maceta, sin embargo, M1 presenta mayor población en PMFC situada en el suelo; en la 10^{-5} las PMFCs situadas en el suelo presentan mayor población microbiana en M1 y M2, en M3 y M4 las PMFCs situadas en la maceta presentan mayor población; en la 10^{-6} las PMFCs de $M4 > M1 > M3$, situadas en la maceta presentan mayor población con respecto a las situadas en el suelo y la M2 presenta mayor población en la PMFC del suelo. A pesar de haber variaciones de resultados en las diluciones, se puede observar que en M1 y M2 las PMFCs situadas en el suelo presentan gran cantidad de microorganismos, en M3 y M4 las PMFCs situadas en la maceta presentan gran población bacteriana con valores de ($1,77 * 10^7$; $8,16 * 10^7$; $5,50 * 10^7$ y $4,37 * 10^7$) UFC/ml respectivamente.

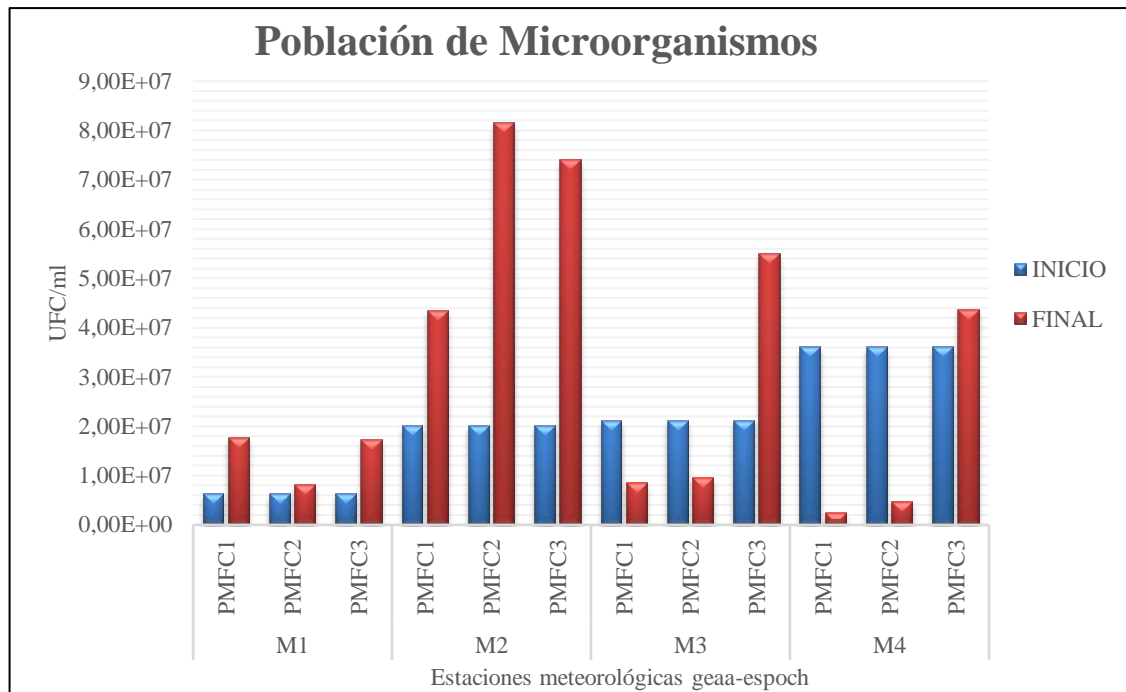


Gráfico 2-3. Variabilidad de los microorganismos en la etapa inicial y final de la implementación de las PMFCs.

Realizado por: Pilco Laura, 2022.

El gráfico demuestra los resultados del incremento y disminución de los microorganismos en cada una de las celdas de combustible microbiano tipo planta implementadas en las estaciones de Atillo, San Juan, Multitud y Aña Moyocancha. En M1 y M2 podemos decir que la población de los microorganismos existentes en la etapa inicial se ha incrementado paulatinamente en todas las PMFCs implementadas, tanto en suelo como en macetas, podemos mencionar que el incremento de la población bacteriana se debe a las constantes precipitaciones, además las muestras extraídas para su respectivo cultivo se realizó los días lluviosos, en la cual la vegetación en M1 se encontró con nuevos rebrotes y en M2 las plantas se encontraban vivas con flores y semillas; mientras que en M3 y M4 la cantidad de población de microorganismos existentes en la etapa inicial ha decrecido en las PMFCs ubicadas en el suelo, posiblemente por intenso radiación solar, ausencia de precipitaciones, y en M4 además de los factores mencionados anteriormente, se sumaría los fuertes vientos existentes en el mes de junio, a pesar de ello, la población de microorganismos ha incrementado en las macetas debido a la marchites de la planta. Al comparar las cuatro estaciones meteorológicas, podemos describir que la población de microorganismos de la estación meteorológica de San Juan sobrepasa el incremento de las demás poblaciones, seguidas de Multitud, Aña Moyocancha y Atillo. Las muestras se diferenciaban entre sí, por el color del suelo, M1, M2, M3 y M4 tenían color negruzco con estructura poco compacto, café claro con estructura suelta, café oscuro con estructura suelta y negro con estructura más compacta, respectivamente.

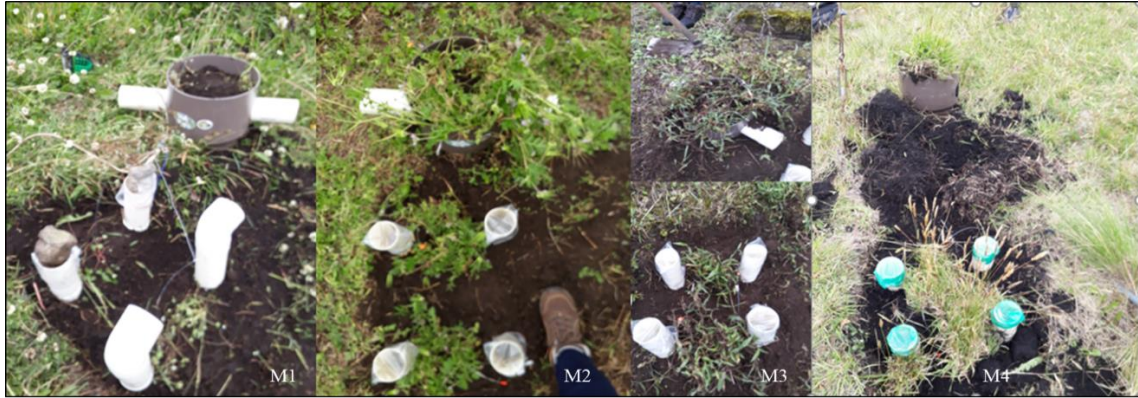


Figura 11-3. Vegetación existente en el área de muestreo de suelo y la implementación de PMFCs en cada estación meteorológica de la provincia de Chimborazo

Realizado por: Pilco Laura, 2022.

En la figura 10-3, demuestra la vegetación existente al inicio de la implementación de las PMFCs, en ella, se puede observar que alrededor de las PMFCs implementadas existen vegetación abundante en Atillo y Aña Moyocancha, mientras que en San Juan y Multitud hubo poca vegetación. Por ende, la población de los microorganismos en M1 fue la menor de todas las PMFCs, debido a la variedad de plantas existentes en el área de muestreo de suelo e implementación de las celdas de combustible microbiano tipo planta; en M4 la población de los microorganismos es abundante con respecto a las demás PMFCs por la existencia en gran cantidad de un solo tipo de ejemplar; en M2 y M3 se obtuvieron valores intermedios de la población de microorganismos entre M1 y M4, posiblemente se deba a la escasa vegetación y poca variedad de las plantas existentes en cada una de las estaciones meteorológicas.



Figura 12-3. Aspectos generales de los ejemplares implementados en las PMFCs, posterior a la recolección de datos de cada estación meteorológica

Realizado por: Pilco Laura, 2022.

En la figura 11-3, se pudo observar los aspectos generales de los ejemplares implementadas en cada una de las PMFCs, la imagen fue tomada al culminar la recolección de datos, en ella, se pudo notar que el ejemplar implementado en las PMFCs de Atillo se habían marchitado y consiguiente hubo rebrotes nuevos, en ella se notó el incremento de los microorganismos; en San Juan algunos ejemplares de los PMFCs se habían marchitado, sin embargo en la PMFC1 se notó plantas jóvenes sin flores y de gran tamaño, en la PMFC2 la planta era de gran tamaño, algunas con flores y otros con semillas, la PMFC3 presento solo plantas pequeñas de aproximadamente 3-4 cm con presencia de flores, en todas las PMFCs hubo incremento de la población microbiana; en Multitud la planta de la maceta se encontraba en proceso de marchites con presencia de espigas y hojas amarillentas, en ella hubo gran cantidad de microorganismos, mientras que en el suelo las plantas eran de gran tamaño con hojas verdes y ausencia de espigas pero con baja cantidad de microorganismos; en Aña Moyocancha las plantas de la maceta estaban marchitas con espigas maduras, de la muestra de suelo analizado se obtuvo abundante población bacteriana con respecto a las plantas ubicadas en el suelo que presentaban hojas marchitas con espigas verdes y abundantes retoños.

3.1.4. Análisis de la producción de bioelectricidad por estación.

El análisis de la producción de bioelectricidad consistió en recolectar datos de voltaje y corriente, conectando las PMFCs al Datalogger instalado en cada estación meteorológica automática, sin embargo, por problemas de configuración esto se logró únicamente en la estación ubicada en Atillo y solo se recolecto datos de voltaje, dado la situación se decidió construir dos prototipos caseros de recolección de datos con las cuales se recolecto ambas variables en la estación de Atillo y San Juan durante 15 días, pero una vez instalado en Multitud y Añamoyocancha recolectaron los primeros minutos y estas se estropearon, con lo que pudimos comprobar que la vida útil de estos prototipos es muy bajo y la reparación tenía un coste elevado por lo que no se pudo completar la recolección en las estaciones antes mencionadas.

El análisis de los datos obtenidos se lo realiza mediante promedios hora, la información de los factores ambientales fueron tomados de manera horaria, mientras que la producción de voltaje y corriente fue tomada en minutos, dicha base de datos fue transformada a promedio horario. Esto con el fin de mostrar la evolución promedio diaria de estos factores.

Atillo

- **Datos recolectados por el Datalogger**

Descripción de los datos

La recolección de los datos se realizó desde el 07/12/2021 (día de la implementación de PMFC), mediante el Datalogger, la cual fue programada para que recolecte la producción de bioelectricidad cada minuto hasta el 26/03/2022, en la cual se obtuvo 194401 datos y su unidad de medida fue en voltios; se obtuvo 2635 datos de las variables meteorológicas (Temperatura Ambiente, Temperatura de suelo y Radiación solar directa). Para hallar los valores estadísticos, correlación de Spearman y construcción de graficas de evolución de las variables meteorológica y voltaje, se trabajó con los datos promedios por horas (24 datos), además, la evolución del voltaje diario se realizó con 110 datos, pertenecientes a promedios diarios.

Variables meteorológicas (Temperatura del suelo, ambiente y radiación solar directa)

Tabla 11-3. Resumen estadístico de variables meteorológicas.

Estadísticos	Temperatura Ambiente	Radiación solar Directa	Temperatura de suelo
Media	8,442	33,603	11,20
Mediana	7,631	1,382	11,22
Mínimo	5,398	0,000	10,89
Máximo	12,178	117,639	11,45

Realizado por: Pilco Laura, 2022.

La tabla 11-3, muestra la descripción de las variables analizadas con promedios horarios (24 datos) en la estación meteorológica de Atillo, el análisis mostró que la temperatura ambiente tiene un promedio de 8,442 °C con una mediana de 7,631 °C, temperatura mínima de 5,398 °C y temperatura máxima de 12,178 °C. La radiación solar directa mostro un promedio de 33,603 W/m^2 , su mediana de 1,382 W/m^2 , con un valor mínimo de 0 en las noches y un valor máximo de 117, 639 W/m^2 durante el día. El promedio de la temperatura de suelo a -10 cm (Dentro del suelo) fue de 11,20 °C, la mediana de 11,22 °C, con un valor mínimo de 10,89 °C y alcanzado un máximo de 11,45 °C.

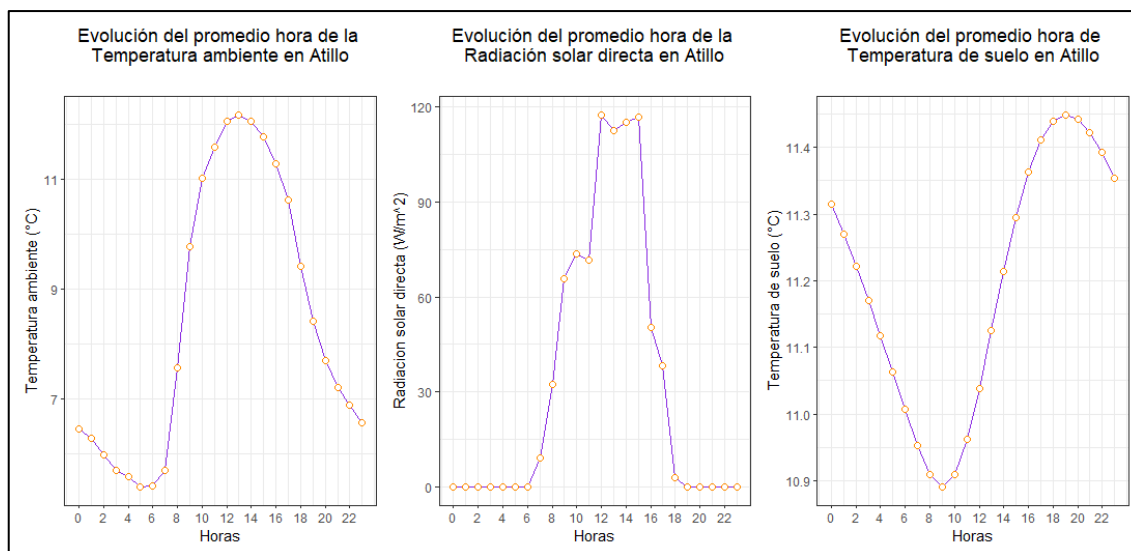


Gráfico 3-3. Promedio hora de las variables meteorológicas en estudio

Realizado por: Pilco Laura, 2022.

El gráfico 3-3, demuestra los resultados obtenidos con 24 datos, para el cual se trabajó con promedios horarios de cada variable. En la imagen se puede observar que la temperatura ambiente incrementa paulatinamente a partir de las 05:00h hasta alcanzar la máxima temperatura a las 13:00h, posteriormente la temperatura ambiente decrece en el transcurso del tiempo hasta alcanzar la mínima temperatura; la radiación solar directa asciende a partir de las 06:00h, alcanzando el máximo a las 12:00h y el mínimo a las 19:00h; la temperatura de suelo a -10cm comienza a ascender a partir de las 09:00h hasta las 19:00h, a partir de allí comienza a descender hasta alcanzar la más baja temperatura a las 09:00h.

Generación de voltaje (V)

Tabla 12-3. Estadísticos descriptivos de la producción de voltaje en Atillo.

Estadísticos	PMFC1 (V)	PMFC2 (V)	PMFC3 (V)
Media	0,060	0,144	0,086
Mediana	0,061	0,144	0,086
Mínimo	0,056	0,138	0,082
Máximo	0,064	0,151	0,089

Realizado por: Pilco Laura, 2022.

La tabla 12-3, demuestra los resultados obtenidos de la descripción del voltaje generado en horas por cada una de las PMFC implementadas en Atillo, entonces, la PMFC1 en comparación a las demás produce menor voltaje con promedio de 0,060 V, mediana de 0,061 V, valor mínimo de

0,056 V alcanzando un máximo de 0,064 V; la PMFC2 mostro mayor generación de voltaje en comparación a las tres, con promedio y mediana de 0,144 V, se registró el valor más bajo de 0,138 y alcanzando un valor máximo de 0,151 V; Por otra parte, en la PMFC3 se registró una producción de voltaje media entre los tres, con promedio y mediana de 0,086 V, con un mínimo de 0,082 V y un máximo de 0,089 V.

En las visitas realizadas se pudo observar que las plantas se marchitaban en todas las PMFCs, a pesar de ello en la PMFC2 y PMFC3 hubo mayor cantidad de rebrotes y la PMFC1 presento escasos rebrotes. La producción de electricidad en la PMFC1 a pesar de estar ubicada en el suelo es la más baja en comparación a la PMFC2 y PMFC3 (maceta), esto debido al escaso rebrote, la PMFC2 poseía mayor cantidad de rebrotes e incluso se presenció el crecimiento de una planta de diente de león, por ello la producción en ella es la más alta y la PMFC3 presento pocos rebrotes con crecimiento de otro tipo de arbustos, por ende, la generación de bioelectricidad en este caso sobrepasa a la de PMFC1.

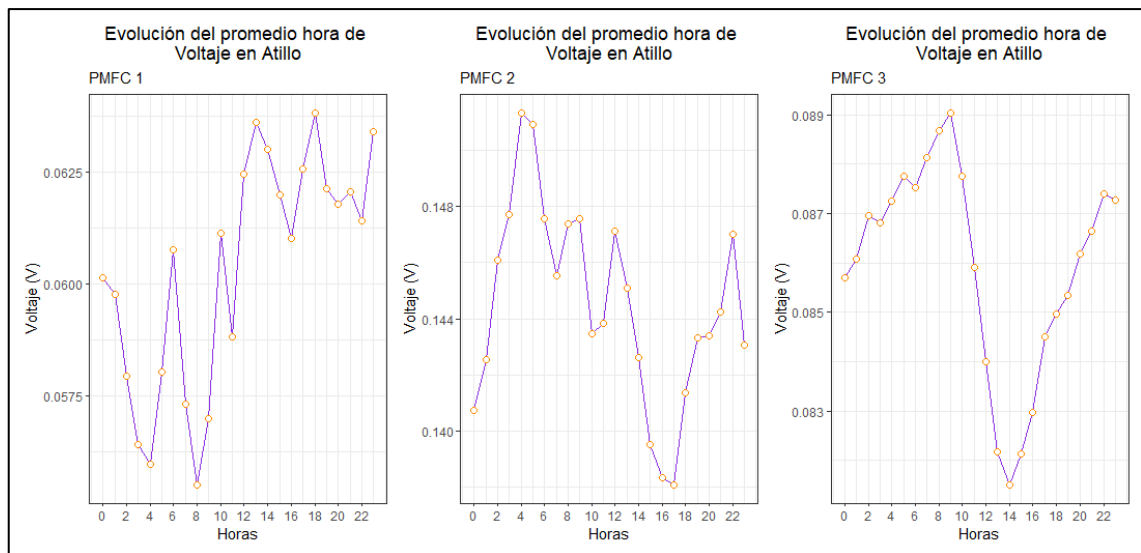


Gráfico 4-3. Evolución del voltaje según la hora en Atillo

Realizado por: Pilco Laura, 2022.

La evolución en función del tiempo se puede observar en el gráfico 4-3, donde demuestra que la generación de voltaje en las tres PMFCs decae durante el día a diferentes horas, la PMFC1, PMFC2 y PMFC3 genera el más bajo voltaje a las 04:00h, 18:00h y 14:00h respectivamente e incrementa paulatinamente durante el transcurso del día y el atardecer, así la PMFC1, PMFC2 y PMFC3 incrementa al máximo a las 18:00h, 04:00h y 09:00h respectivamente. Existe producción de voltaje durante el día y la noche, en la cual, la generación se incrementa en diferentes horas y del mismo modo se decae, cada uno de los PMFCs presentaron diferentes comportamientos al respecto de la producción de electricidad.

Evolución diaria de Voltaje en Atillo

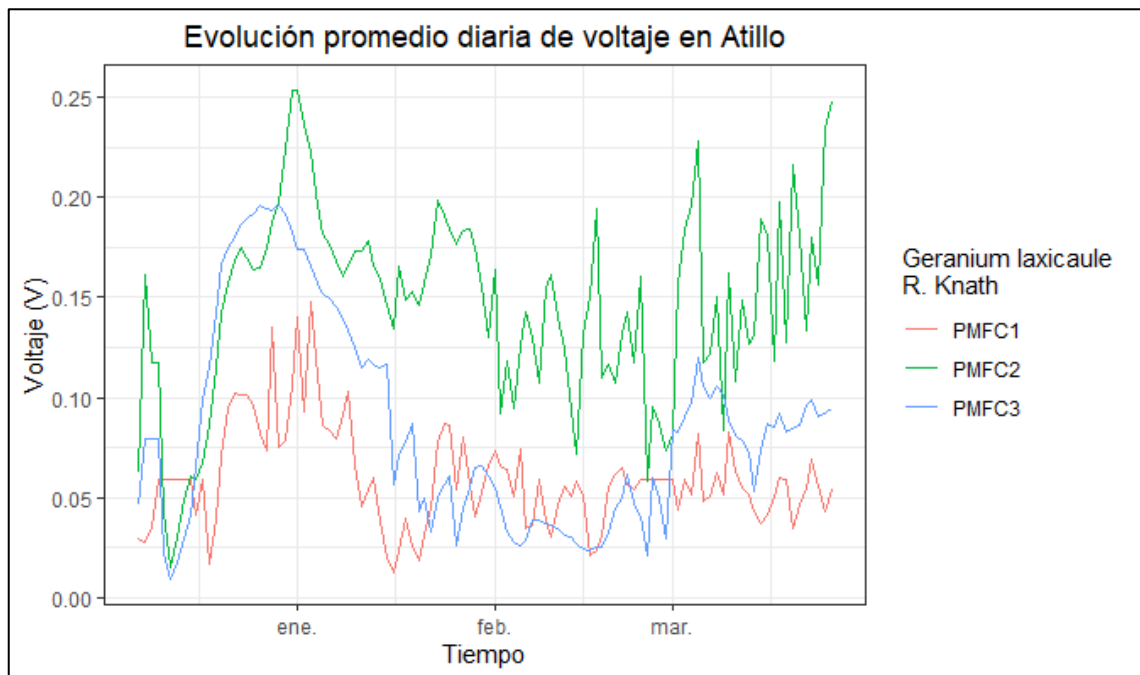


Gráfico 5-3. Promedio de Voltaje vs el tiempo (días)

Realizado por: Pilco Laura, 2022.

El gráfico se construyó con 110 datos, la misma que representó la producción promedio de voltaje en función del tiempo (días), donde se pudo apreciar la generación máxima en la PMFC2, alcanzando los 0,25 V, en su primer mes de adaptación, seguido de PMFC3 con 0,20 V aproximadamente y la PMFC1 con 0,15 V aproximadamente. Las generaciones de voltaje al inicio no son tan distantes uno del otro, posteriormente las tres PMFCs obtienen valores de voltaje que disminuye paulatinamente, demostrando que la PMFC1 produce la menor cantidad de voltaje, aunque su comportamiento se asemeja a la PMFC3 y PMFC2 en su primer mes de implementación. La generación de voltaje en el primer mes de adaptación del *Geranium laxicaule R. Knath* en todas las PMFCs se incrementa paulatinamente debido a que se cultivó plantas jóvenes que aún no alcanzaban su madurez, en el mes de febrero la producción decreció en las PMFCs debido al deceso de la planta, sin embargo, en el mes de marzo incrementa paulatinamente el voltaje en las 3 PMFCs, el mismo mes se observó que aparecen nuevos brotes en las celdas de combustible microbiano tipo planta. Se puede mencionar que el ejemplar implementado en la estación meteorológica de Atillo perteneciente a la familia de Geranaceas poseen un ciclo de vida corta debido a que se observó su adaptación, madurez, marchiteo y regeneración de nuevos brotes, las mismas que aparecían de los estolones de la vegetación marchita.

Test de normalidad

Tabla 13-3. Test de normalidad de las variables meteorológicas con respecto a las PMFCs.

Variable	Estadístico W	p valor	Decisión
Temperatura ambiente	0,869	0,005	Rechazo Ho: No normalidad
Radiación solar directa	0,738	0,000	Rechazo Ho: No normalidad
Temperatura de suelo	0,830	0,001	Rechazo Ho: No normalidad
PMFC1	0,923	0,069	No rechazo Ho: Normalidad
PMFC2	0,971	0,699	No rechazo Ho: Normalidad
PMFC3	0,929	0,092	No rechazo Ho: Normalidad

Realizado por: Pilco Laura, 2022.

En la tabla 13-3, se presentó los resultados de la distribución de los datos obtenidos en las celdas de combustible microbiana tipo planta y estas cumplen con el supuesto de normalidad, mientras que los datos meteorológicos no plasman esta condición. Por tanto, se considera aplicar la correlación o asociación de Spearman para probar dependencia o independencia del voltaje con respecto a las variables meteorológicas. El test de normalidad se realizó con los 24 datos obtenidos del promedio por hora que represento una curva de la evolución diaria de Voltaje y variables meteorológicas, dicho test se ejecutó con la finalidad de conocer si los datos de la generación de voltaje y las variables meteorológicas se asemejan a una campana de Gauss ya que si esto se cumple los datos se distribuyen bajo una ley normal, caso contrario no provienen de una distribución normal, ya que en función de ello se aplicó la asociación por métodos no paramétricos.

Tabla 14-3. Asociación de variables meteorológicas con la producción de voltaje de Atillo.

	PMFC1	PMFC2	PMFC3
Temperatura ambiente	0,572 Dependientes	-0,483	-0,643 Dependientes

Radiación solar directa	0,274	-0,240	-0,413
Temperatura de suelo	0,524	-0,439	-0,610 Dependientes

Realizado por: Pilco Laura, 2022.

La tabla 14-3, contiene el valor de la asociación de Spearman, en la cual indicó que la relación entre la temperatura ambiente, radiación solar directa y temperatura de suelo a una profundidad de 10 cm con la generación de voltaje en cada una de las PMFC implementadas en Atillo, son dependientes e independientes. La PMFC1 mostró una correlación positiva con las tres variables meteorológicas, indicando que si aumenta o disminuyen el valor de las variables meteorológicas la generación de voltaje se incrementara o se disminuirá proporcionalmente, mientras que la correlación con la PMFC2 y PMFC3 son negativas lo cual indica que mientras la temperatura ambiente, radiación solar directa y temperatura de suelo aumente la generación de voltaje disminuye, demostrando que las variables meteorológicas son inversamente proporcionales con la producción del voltaje. La significancia de las correlaciones se prueba mediante el p valor, con una significancia menor a $\alpha = 0,05$. La afirmación de este supuesto implica que el valor de voltaje depende de la temperatura ambiente en la PMFC1, en la PMFC3 existe dependencia significativa con la temperatura ambiente y temperatura de suelo, por otro lado, el voltaje generado por la PMFC2 no depende de ninguna de las variables meteorológicas incluidas en la investigación.

- **Datos obtenidos de un prototipo casero**

Con la ayuda de un prototipo recolector de datos casero se pudo extraer información cada dos minutos de corriente y voltaje generados por las celdas de combustible microbiana tipo planta durante 15 días en época lluviosa, obteniendo 10799 datos de corriente-voltaje y los datos obtenidos de las variables meteorológicas fueron recolectados por el Datalogger de la marca vaisala de forma automática que recolecto un total de 907 datos por hora durante los 15 días. Los datos obtenidos en minutos fueron transformados a promedios horarios, por ende, los cálculos, gráficos y correlaciones fueron hallados con 24 datos. De este modo se evaluó la generación de bioelectricidad.

Generación de corriente y voltaje en Atillo

Descripción de los datos

Tabla 15-3. Resumen descriptivo de corriente y voltaje producidos en Atillo

	PMFC1 (V)	PMFC2 (V)	PMFC3 (V)	PMFC1 (A)	PMFC2 (A)	PMFC3 (A)
Media	0,00027	0,06777	0,00039	0,00003	0,00489	0,00003
Mediana	0,00022	0,06248	0,00029	0,00002	0,0044	0,00003
Mínimo	0,000	0,0335	0,000	0,000	0,00233	0,000
Máximo	0,00165	0,16946	0,00223	0,00018	0,01401	0,00019

Realizado por: Pilco Laura, 2022.

En la tabla 15-3, se encuentra los valores estadísticos descriptivo de los 24 datos, en ella, se demostró que la PMFC1 produce menor cantidad de voltaje ya que su valor máximo llegas hasta los 0,00165 V, a esta le sigue la PMFC3 con un valor máximo de 0,00223 V, vale recalcar que el valor mínimo registrado en ambas celdas es de 0 V, sin embargo, la PMFC2 llegas hasta los 0,16946 V, con un voltaje promedio de 0,06777 V. La generación de corriente para PMFC1 muestra un registro máximo de 0,00018 A, la PMFC2 logra generar hasta los 0,01401 A, la generación mínima fue de 0,00233 A, mientras que la PMFC3 genera una corriente máxima de 0,00019 A. Los resultados obtenidos con el recolector casero y datalogger demostraron gran concordancia, ya que en ambos casos la PMFC2 es la que genera mayor cantidad de voltaje, Seguido de la PMFC3 y PMFC1.

Evolución promedio hora de voltaje-corriente vs tiempo en Atillo

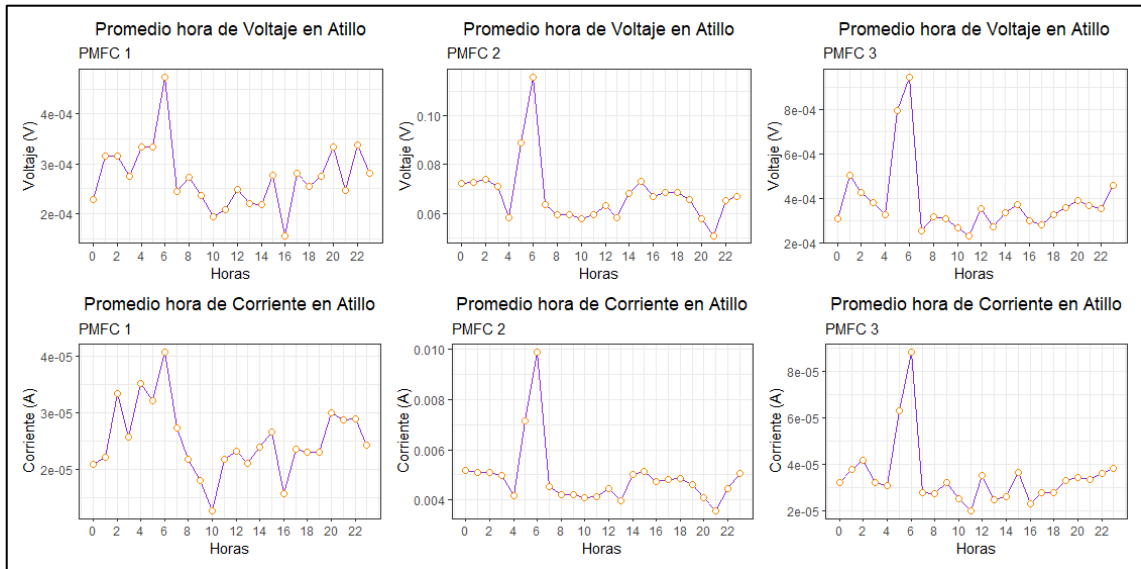


Gráfico 6-3. Evolución horaria de voltaje y corriente

Realizado por: Pilco Laura, 2022.

En el gráfico 6-3, se observó el voltaje y corriente en función del tiempo, de este modo, se pudo notar picos altos de voltaje y corriente en cada una de las PMFCs a las 06:00h, por otro lado, los picos bajos de voltaje se registraron a las 16:00h, 21:00h y 11:00h, mientras que, para la corriente varían entre las 10:00h, 21:00h y 11:00h en PMFC1, PMFC2 y PMFC3 respectivamente. Las plantas generaron corriente y voltaje durante la noche y el día, la PMFC1 y PMFC3 producen mayor cantidad de corriente y voltaje a partir de 00:00h hasta las 06:00h y la PMFC2 incrementa de 04:00 h hasta 07:00 h, por lo tanto, demostraron que existió mayor producción de voltaje y corriente en las madrugadas.

Generación de variables meteorológicas

Tabla 16-3. Descripción de variables meteorológicas de Atillo (15 días)

Estadísticos	Temperatura Ambiente	Temperatura de suelo	Radiación solar Directa
Media	8,04	11,82	10,71
Mediana	7,55	11,82	0,43
Mínimo	5,35	11,51	0,00
Máximo	11,30	12,13	45,11

Realizado por: Pilco Laura, 2022.

La tabla 16-3, muestra el resumen de las variables analizadas en la estación meteorológica de Atillo durante los 15 días de recolección de datos de bioelectricidad, en ella, mostró que la

temperatura ambiente tiene un promedio de 8,04 °C con una mediana de 7,55 °C, temperatura mínima de 5,35 °C y temperatura máxima de 11,30 °C. La radiación solar directa mostro un promedio de 10,71 W/m², su mediana de 0,43 W/m², con un valor mínimo de 0 en las noches y un valor máximo de 45,11 W/m² durante el día. El promedio y mediana de la temperatura de suelo a -10 cm (Dentro del suelo) fue de 11,82 °C, con un valor mínimo de 11,51 °C y alcanzado un máximo de 12,13 °C.

Comportamiento de las variables meteorológicas en el transcurso del tiempo

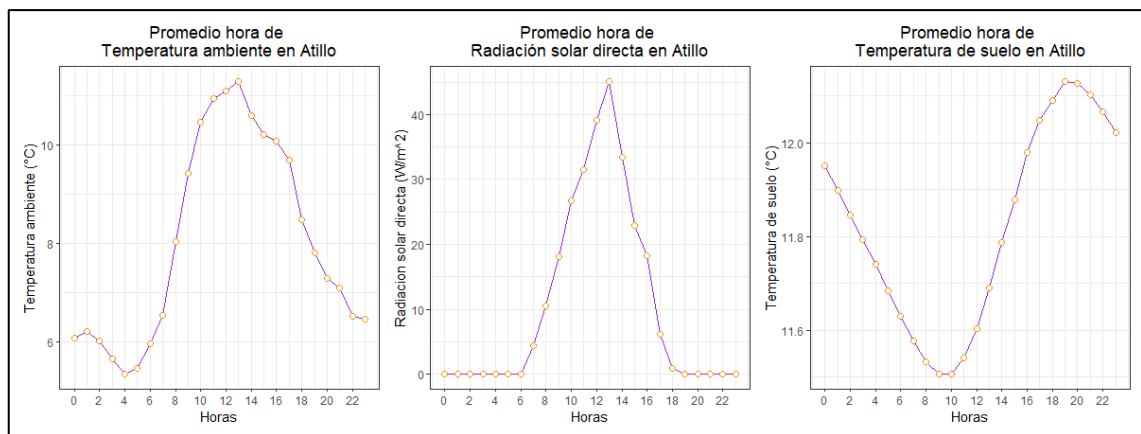


Gráfico 7-3. Variables meteorológicas filtradas durante 15 días

Realizado por: Pilco Laura, 2022.

El cambio en la intensidad de la temperatura ambiente y radiación solar directa, al paso del tiempo aumenta desde el amanecer llegando a su punto máximo al medio día, seguidamente comienza a descender paulatinamente. Por otro lado, el comportamiento de la temperatura de suelo a una profundidad de 10 cm es completamente distinto ya que el punto más bajo esta entre las 09:00h y 10:00h, que posteriormente asciende hasta alcanzar una temperatura máxima a las 19:00h. Estos datos se utilizaron para asociar con la generación de voltaje y corriente mediante el método de Spearman, datos que fueron recolectados por el Datalogger de la marca vaisala.

Correlación con variables meteorológicas

Tabla 17-3. Correlación entre las variables meteorológicas y corriente-voltaje

	PMFC1 (V)	PMFC2 (V)	PMFC3 (V)	PMFC1 (A)	PMFC2 (A)	PMFC3 (A)
Temperatura ambiente	-0,674 Dependent e	-0,437	-0,568	-0,613	-0,463	-0,613

Temperatura de suelo	0,315	0,139	0,375	0,224	0,131	0,266
Radiación solar directa	-0,655 Dependent e	-0,285	-0,582	-0,521	-0,306	-0,612

Realizado por: Pilco Laura, 2022.

En la tabla 17-3, el cálculo de las correlaciones se determinó aplicando la asociación de Spearman, donde se obtuvo valores cercanos y alejados en el rango ± 1 . Se consideró que el par de variables es directamente proporcional si es positivo e inversamente proporcional si es negativo, mientras más cercano a ± 1 presentara una relación fuerte, la validez estadística se verificó comparando el p valor y su nivel de significancia ($\alpha=0,05$), mostro que el voltaje producido por la PMFC1, depende de la temperatura ambiente y la radiación solar directa, por otra parte las PMFC2 y PMFC3 mostraron ser independientes, aunque su representación llegó superar a 0,6 para algunos casos.

San Juan

Los datos de las variables meteorológicas en estudio fueron obtenidos por el Datalogger automático por hora y la producción de voltaje-corriente se obtuvo mediante el aparato de recolección de datos casero cada dos minutos, en este apartado se recolecto un total de 10800 datos de voltaje y corriente y, 859 datos de las variables meteorológicas durante los 15 días. El análisis esta realizado con promedios por hora de todas las variables (24 datos).

Descripción de los datos

Tabla 18-3. Estadísticos descriptivos de corriente y voltaje generado en San Juan

Estadísticos	PMFC1 (V)	PMFC2 (V)	PMFC3 (V)	PMFC1 (A)	PMFC2 (A)	PMFC3 (A)
Media	0,1504	0,0467	0,0309	0,0177	0,0064	0,0038
Mediana	0,1506	0,0468	0,0308	0,0177	0,0064	0,0038
Mínimo	0,1483	0,0442	0,0298	0,0171	0,0061	0,0034
Máximo	0,1519	0,0492	0,0321	0,0186	0,0069	0,0039

Realizado por: Pilco Laura, 2022.

La tabla 18-3, demuestra que la PMFC1 es la que produjo mayor cantidad de voltaje con valor máximo de 0,1519 V, a esta le sigue la PMFC2 con un valor máximo de 0,0492 V y PMFC3 con

0,0321 V, mientras que la generación de corriente es mayor en la PMFC1, PMFC2 y PMFC3 con valores máximos de 0,0186 A; 0,0069^a; 0,0039A, respectivamente. En este caso la laPMFC3 genera menor cantidad de voltaje e intensidad de corriente con respecto a las demás PMFCs, esto se debe a la presencia de las plantas, la PMFC1 genera mayor cantidad de voltaje-corriente por la presencia de plantas jóvenes, la PMFC2 produce un poco más bajo que el anterior debido a las plantas con flores y semillas, mientras que la PMFC3 genera menor cantidad por poseer plantas pequeñas con flores.

Evolución del promedio hora de voltaje y corriente vs tiempo en San Juan

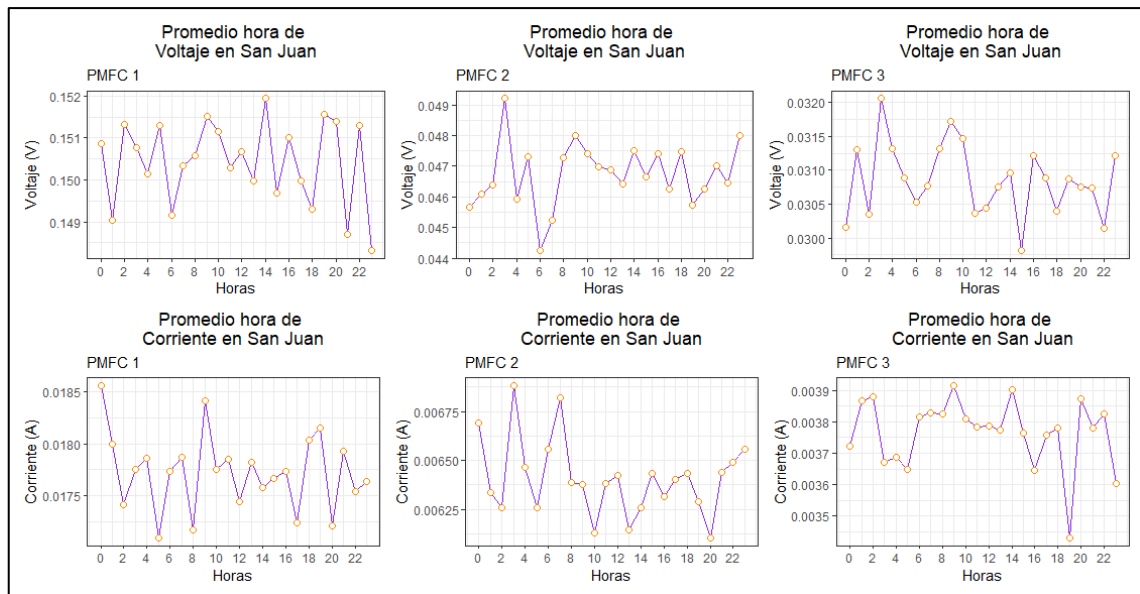


Gráfico 8-3. Corriente y voltaje en función del tiempo

Realizado por: Pilco Laura, 2022.

En el gráfico 8-3, se observó el voltaje y corriente en función del tiempo, notándose picos altos y bajos al paso de las horas en cada uno de los casos, mostrando registros mínimos de voltaje a las 23:00h, 06:00h y 15:00h, para la PMFC1, PMFC2 y PMFC3, respectivamente. Mientras que, la producción de corriente mostró valores mínimos a las 05:00h, 20:00h y 19:00h para PMFC1, PMFC2 y PMFC3 respectivamente. Este tipo de pico es una clara muestra de que no dependen de las variables meteorológicas ya que estas describen curvas pronunciadas. La producción de corriente y voltaje se relacionó con las plantas existentes en cada PMFCs, la PMFC1 mostro mayor producción de corriente y voltaje, en ella hubo plantas jóvenes con hojas verdes y tamaño aproximado de 10cm, la PMFC2 tenía plantas adultas de aproximadamente 10cm con flores y semillas y la generación de voltaje y corriente menor a la PMFC1, mientras que la PMFC3 obtuvo menor producción de voltaje y electricidad, su vegetación era de aproximadamente 3-5cm de altura con flores.

Tabla 19-9. Descripción de las variables meteorológicas de San Juan (15 días)

Estadísticos	Temperatura Ambiente	Temperatura de suelo	Radiación solar Directa
Media	10,19	14,04	57,10
Mediana	9,10	13,92	0,98
Mínimo	6,98	12,71	0,00
Máximo	15,12	15,46	238,24

Realizado por: Pilco Laura, 2022.

En la tabla 19-9, se presenta una descripción de las variables meteorológicas referentes a los 15 días de toma de datos de bioelectricidad, el análisis mostró que la temperatura ambiente tiene un promedio de 10,19°C con una mediana de 9,10 °C, temperatura mínima de 6,98 °C y temperatura máxima de 15,12 °C. La radiación solar directa mostro un promedio de 57,10 W/m^2 , su mediana de 0,98 W/m^2 , con un valor mínimo de 0 W/m^2 en las noches y un valor máximo de 238,24 W/m^2 durante el día. El promedio de la temperatura de suelo a -10 cm (Dentro del suelo) fue de 14,04 °C, la mediana de 13,92 °C, con un valor mínimo de 12,71 °C y alcanzado un máximo de 15,46 °C.

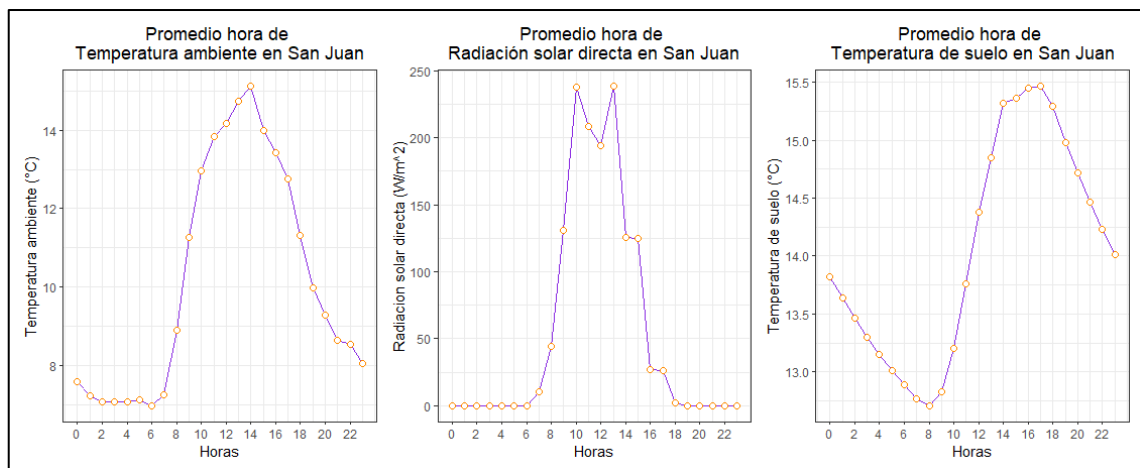


Gráfico 9-3. Variables meteorológicas de San Juan en función del tiempo

Realizado por: Pilco Laura, 2022.

En el gráfico 9-3, demostró que la temperatura ambiente y radiación solar se mantuvieron en valores próximos a cero durante la noche, mientras que, desde el amanecer comenzó a ascender y llegar a valores altos entre las 12:00h y 15:00h, luego comienzo a descender mientras dura el día. Por otro lado, la temperatura del suelo mostro un valor mínimo entre las 08:00h y 09:00h, su valor más alto se registró a las 16:00h, de donde comienzo su descenso. Las tres variables

meteorológicas presentaron incremento durante el día y la noche se presentó descenso contante, alcanzando valores mínimos por la mañana.

Correlación con variables meteorológicas

Tabla 20-3. Correlación de variables meteorológicas con corriente y voltaje en San Juan.

	PMFC1 (V)	PMFC 2 (V)	PMFC3 (V)	PMFC1 (A)	PMFC2 (A)	PMFC3 (A)
Temperatura ambiente	-0,647 Dependiente	-0,394	-0,507	-0,585	-0,401	-0,591
Temperatura de suelo	-0,187	0,015	-0,009	-0,171	-0,015	-0,178
Radiación solar directa	-0,695 Dependiente	-0,377	-0,669 Dependiente	-0,599	-0,403	-0,669 Dependiente

Realizado por: Pilco Laura, 2022.

Las correlaciones entre las distintas variables tienen valores que llegan a un mínimo de -0,695 y un máximo de 0,015, es una clara evidencia de que la corriente y voltaje no dependen de manera directa con las variables meteorológicas, sin embargo, la significancia de estos valores se da en el voltaje generado por la PMFC1 se relaciona de manera inversa con la temperatura ambiente y radiación solar directa, del mismo modo la corriente y voltaje producidos por la PMFC3 tienen dependencia negativa con la radiación solar directa.

Multitud y Aña Moyocancha

Tabla 21-3. Datos recolectados de corriente y voltaje en Multitud y Aña Moyocancha

Estación	PMFC1		PMFC2		PMFC3	
	V1	C1	V2	C2	V3	C3
Multitud	0,2577	0,0272	0,0032	0,0004	0,2243	0,0138
Aña Moyocancha	0	0,0004	0	0	0,0162	0
	0	0,0004	0	0	0,0237	0
	0,0011	0,0004	0	0	0,0086	0

Realizado por: Pilco Laura, 2022.

La tabla 21-3, presentó los datos obtenidos en las estaciones de Multitud y Aña Moyocancha, esto datos fueron recolectados cada 2 minuto, en dichas estaciones la implementación se realizó el día

07/05/2022, luego de 15 días se procedió a la recolecta de información generada por las PMFCs donde se corroboró na inexistencia de datos ya que los prototipos caseros se dañaron, por lo cual se procedió a cotizar la reparación para una nueva implementación durante el mes de junio, sin embargo la recuperación de estos aparatos conllevó a costos elevados, además las plantas implementadas en las celdas de combustible se marchitaron y esto imposibilitó la recolecta final en estas estaciones meteorológicas.

3.1.5. *Curvas de polarización y potencia de cada zona de estudio*

El siguiente apartado se realizó con los datos obtenidos por un recolector casero, mediante la relación de variables de voltaje Vs corriente para la curva de polarización y densidad de potencia vs corriente para la curva de potencia. El recolector casero se construyó debido al inconveniente presentado en las estaciones meteorológicas, ya que la programación implementada en los dataloggers no fue aceptada. Las estimaciones de las curvas para ambas estaciones meteorológicas se realizaron con 720 datos por hora y cada dos minutos, sin tomar en cuenta los días.

Estación meteorológica de Atillo

Tabla 22-3. Resumen de la densidad de potencia en Atillo

Estadísticos	PMFC1	PMFC2	PMFC3
Media	$2,00 * 10^{-8}$	$3,14 * 10^{-4}$	$4,00 * 10^{-8}$
Mediana	0,00	$3,80 * 10^{-5}$	0,00
Mínimo	0,00	0,00	0,00
Máximo	$1,74 * 10^{-6}$	$2,25 * 10^{-2}$	$8,61 * 10^{-6}$

Realizado por: Pilco Laura, 2022.

La densidad de potencia máxima mostrada en la tabla 21-3, en Atillo fue de $1,74 * 10^{-6}$; $2,25 * 10^{-2}$ y $8,61 * 10^{-6} W/m^2$, en la PMFC1, PMFC2 y PMFC3 respectivamente, estos datos son referidos a los 15 días de toma de datos de bioelectricidad, de este modo se determinó la mayor densidad de potencia en la PMFC2 y la menor en PMFC1. Además, el valor mínimo registrado corresponde a 0.

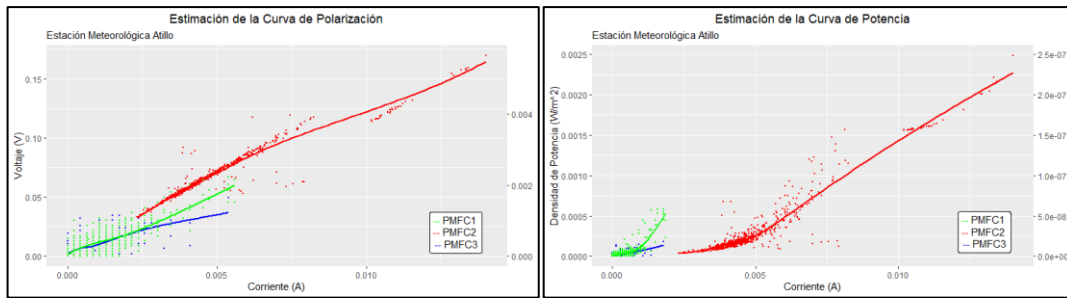


Gráfico 10-3. Curvas de polarización y potencia de la estación meteorológica de Atillo

Realizado por: Pilco Laura, 2022.

El gráfico de la izquierda representa la curva de polarización la cual muestra una relación creciente y directamente proporcional, la PMFC2 cuenta con una generación eléctrica mayor con un voltaje superior a 0.15 V, mientras que la PMFC1 tiene una generación menor a 0,002 V, y la PMFC3 con la menor generación eléctrica y esta concuerda con la instalada en la maceta. La curva de potencia se observa en el gráfico de la derecha donde su magnitud depende del voltaje y el área del ánodo utilizado para la captación de electrones, su mayor generación fue en la PMFC2 y las más bajas en la PMFC1 y PMFC3.

Estación meteorológica de San Juan

Tabla 23-3. Resumen de la densidad de potencia en San Juan

Estadísticos	PMFC1	PMFC2	PMFC3
Media	$4,25 * 10^{-4}$	$4,69 * 10^{-5}$	$2,15 * 10^{-5}$
Mediana	$4,19 * 10^{-4}$	$4,14 * 10^{-5}$	$1,80 * 10^{-5}$
Mínimo	$2,68 * 10^{-4}$	$4,19 * 10^{-6}$	$7,70 * 10^{-7}$
Máximo	$6,03 * 10^{-4}$	$1,14 * 10^{-4}$	$5,78 * 10^{-5}$

Realizado por: Pilco Laura, 2022.

La densidad de potencia en la estación meteorológica de San Juan obteniendo $6,03 * 10^{-4}$; $1,14 * 10^{-4}$; $5,78 * 10^{-5} W/m^2$, de mismo modo corresponde a los 15 días de registro con el prototipo casero, de este modo se determinó la mayor densidad de potencia en la PMFC1 y la menor en PMFC3. Además, los valores mínimos registrados se encuentran por encima de cero.

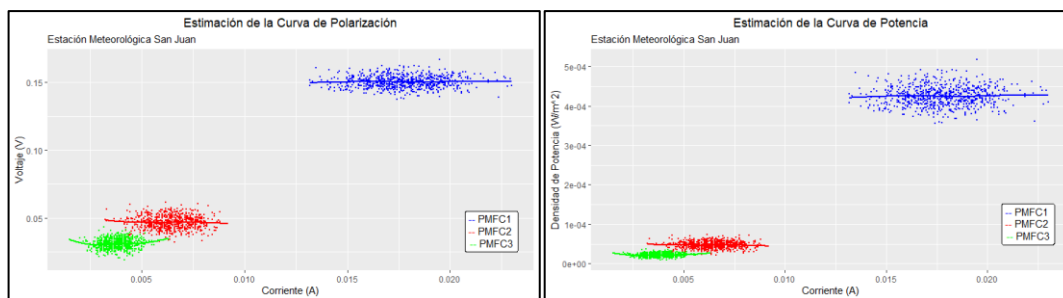


Gráfico 11-3. Curvas de polarización y potencia de la estación meteorológica de San Juan.

Realizado por: Pilco Laura, 2022.

El gráfico de la izquierda representó la curva de polarización la cual muestra una relación constante ya que su dispersión determina una línea horizontal, la PMFC1 cuenta con una generación eléctrica alta con alrededor de 0.15 V, mientras que la PMFC2 tiene una generación menor que fluctúa en 0,05 V, con la PMFC3 con la menor generación eléctrica. La curva de potencia determina una mayor generación eléctrica en PMFC1 y las más bajas en la PMFC2 y PMFC3.

3.2. Discusión

La vegetación predominante en la estación de Atillo, San Juan, Multitud y Aña Moyocancha fue la especie de *Geranium laxicaule R. Knath* perteneciente a la familia de Geranaceae, *Frodium moschatun* perteneciente a la familia de Siperaceae, *Paspalum conjugatum* perteneciente a la familia de Poaceae y *Holcus lanatus L.* perteneciente a la familia de Poaceae respectivamente, esto se puede corroborar con la investigación realizada en el Proyecto Atlas Mundial de los Paramos, que mencionan que los páramos del ecuador empiezan a una altura de 3,000 msnm, por su altura, ubicación, clima y precipitación, poseen vegetación abundante, sin embargo las que más predominan son la familia de Asteraceae, Poaceae, Orchidaceae, melastomataceae, Scrophulariaceae, etc., (Hofstede, Segarra y Mena, 2004, p. 106).

Según (Mena y Medina, 2000), menciona que los suelos de paramo poseen menor cantidad de materia orgánica con respecto a suelos cultivables, sin embargo dichos suelos poseen gran diversidad microbiológica entre 0-20 cm de profundidad debido a la acumulación de materia orgánica a dicha profundidad y su descomposición lenta que se ve afectada por las temperaturas bajas, además los suelos de paramos poseen gran cantidad de humedad que ralentiza la descomposición de materia orgánica y el crecimiento de las diversas especies de plantas (Llambí et al., 2012, p. 194), de acuerdo a estas referencias se extrajo la muestra de suelo a 12 cm de profundidad y se cultivó desde la dilución 10^{-3} hasta 10^{-6} por duplicado, en el cual se obtuvo una carga microbiana variada de cada punto de muestreo, en la etapa inicial la carga microbiana promedio fue de $6,31 \times 10^6$

UFC/ml; $2,02 * 10^7$ UFC/ml; $2,11 * 10^7$ UFC/ml; $3,60 * 10^7$ UFC/ml en M1, M2, M3 y M4, respectivamente, la población microbiana presente en cada localidad fue diversa, la misma que concuerda con (Hofstede, Segarra y Mena, 2004, p. 116) que menciona que la micro flora abundante son bacterias rhizobium para la fijación de nitrógeno, rickettsias, virus, bradyrhizobium, micoplasmas, hongos y levadura, además la vegetación en el área de muestreo del suelo en San Juan y Multitud fue escaso con poca variabilidad, por ello, la cantidad de microorganismos no difieren tanto en sus valores, mientras que Atillo presento vegetación abundante con gran variabilidad y poco microorganismos, y Aña Moyocancha poseía gran cantidad de vegetación con poca variabilidad y alta población microbiana. Al finalizar la recolección de datos de la producción de electricidad la carga microbiana se ha incrementado en M1, M2 tanto en maceta como en el suelo, sin embargo, en M3 y M4 solo se incrementó en las macetas y decreció en el suelo, el incremento de la población microbiana se debe a la oxigenación del suelo, descomposición rápida de materia orgánica (Camacho, 2013, pp. 77-92), también puede estar relacionado al tipo de planta y su simbiosis, así como de la presencia de microorganismos benéficos que ayudan a su buen desarrollo durante su crecimiento, población de descomponedores en el momento de su marchites, la disponibilidad de agua, etc., (INECOL (Instituto de Ecología A.C), 2017), por tal razón en Atillo y San Juan se incrementó la población de los microorganismos tanto en el suelo como en la maceta, y en Multitud y Aña Moyocancha hubo incremento en la maceta, debido a la presencia de microorganismos descomponedores que degradan las plantas muertas, esto concuerda con los resultados obtenidos de la investigación de paramos (Cárdenas, 2015, pp. 75-76), menciona que el aumento de la población microbiana se da por la alteración de la estructura de suelo, deyecciones de animales y la muerte de plantas, las mismas que incorporan minerales y nutrientes al descomponerse; mientras que la ausencia de los microorganismos se debe a la baja cantidad de materia orgánica de los suelos, baja humedad del suelo que se presenta por la ausencia de la capa de vegetación protectora (Camacho, 2013, pp. 77-92), y factores interdependientes de la escasa disponibilidad de agua, tipo de pH, temperatura etc., (OPS (Organización Panamericana de la Salud), 2015), además, la baja cantidad de microorganismo puede haber sido provocado por factores ambientales y por el medio de cultivo utilizado, ya que cada tipo de microorganismos requieren de diversos medios de cultivos, algunos estrictos y otros que crecen en cualquier medio.

La producción de voltaje en las PMFCs no depende de la cantidad de materia orgánica presente, ya que a mayor cantidad de materia orgánica la población microbiana es pequeña, sin embargo, al incrementar la población bacteriana la materia orgánica disminuye y la producción de voltaje es alto, cuando se agote el contenido de materia orgánica la población de bacterias y el voltaje disminuye paulatinamente (Buitrón y Pérez, 2011), los resultados obtenidos en Atillo y San Juan no concuerda con Buitrón y Pérez, ya que en Atillo se obtuvo en la PMFC1 menor producción de voltaje (0,064 V) a mayor cantidad de microorganismo y escasos rebrotes de plantas, la PMFC2

presento mayor producción de voltaje (0,151 V) con baja población microbiana y mayor cantidad de rebrotes de plantas con respecto a las demás PMFCs, la PMFC3 genero voltaje (0,089V) intermedio entre los tres PMFCs, también, la población microbiana y cantidad de rebrotes fue más bajo que PMFC1 y más alto que PMFC2, además, al comparar la producción de voltaje recolectado de manera automática por el Data logger de la estación y prototipo casero la PMFC2>PMFC3>PMFC1 con voltaje máximo de 0,1695V; 0,0022V y 0,0017V respectivamente, especificando que los primeros datos obtenidos fueron sin la resistencia y los datos recolectados con el prototipo casero tenían resistencia de 10 Ω con circuitos paralelos; en San Juan se pudo observar que la generación de voltaje máxima es de 0,1669V, 0,0624V y 0,0434V en la PMFC1, PMFC2 y PMFC3, respectivamente, la PMFC1 presento menor cantidad de microorganismos con respecto a las PMFCs implementadas y las plantas se encontraban jóvenes de aproximadamente 10cm sin flores, la PMFC2 tenía mayor cantidad de población microbiana y plantas adultas con flores y semillas, y en la PMFC3 hubo población microbiana intermedia con respecto a las PMFCs y la planta era de aproximadamente 5cm con flores.

En Atillo y San Juan se obtuvo una densidad de potencia máxima de 0,0017 mW/m² (PMFC1); 22,5394 mW/m² (PMFC2); 0,0086 mW/m² (PMFC3); 0,6031 mW/m² (PMFC1); 0,1139 mW/m² (PMFC2); 0,0578 mW/m² (PMFC3), respectivamente, registradas durante los 15 días de recolección de datos, los materiales utilizados para la construcción de las PMFC fueron tubos de barro y electrodos de fibra de carbono, (Kabutey et al., 2019, p. 405) mencionan que al utilizar la fibra de carbono como electrodos generan un máximo de densidad de potencia de 69,32 mW/m², 80,26 mW/m² y 222,54 mW/m² durante 30 días en plantas de *Brassica Juncea*, *Trigonella foenumgraecum* y *Canna Stuttgart*, respectivamente, en base a ello se puede decir que la producción de voltaje no solo depende de la fibra a utilizar, más bien depende del tipo de planta, sustrato, microorganismos, etc.

CONCLUSIONES

La población microbiana en Atillo y San Juan tuvo un aumento representativo respecto al conteo inicial; sin embargo, en Aña Moyocancha y Multitud presentó un descenso moderado con el valor inicial en las PMFCs ubicados en el suelo. Respecto a la maceta se registró un incremento leve. La presencia de abundante precipitación en los meses de diciembre-mayo, rizo-depósitos y plantas muertas incrementó la población microbiana, mientras que la baja población obtenida se debió en parte por la recolección de muestra en el mes de junio época seca, medios específicos de cultivo, entre otros factores.

Se instaló PMFCs 2 en suelo y 1 en maceta en cada una de las estaciones de Atillo, San Juan, Multitud y Aña Moyocancha, con plantas de: *Geranium laxicaule R. Knath*, *Frodium moschatun*, *Paspalum conjugatum* y *Holcus lanatus L.* respectivamente.

La estimación de la curva de polarización denotó su forma típica con los datos recolectados en Atillo observándose la zona óhmica, pseudomeseta y electroconvección, encontrándose mayor eficiencia de generación eléctrica en la PMFC2, la PMFC1 tuvo una generación menor a 0,002 V y la que género menor cantidad de electricidad fue la PMFC3. La curva de potencia mostró una relación creciente para cada una de las celdas alcanzando un mayor potencial por parte de la PMFC1. Con la información de San Juan se estimó la curva de polarización que se mantuvo aproximadamente constante, es decir su generación eléctrica no determinó las tres zonas como en Atillo, aunque su mayor generación concuerda con la PMFC1 y su mínima generación con la PMFC3, a pesar de no mostrar dichas zonas mencionadas anteriormente las tres PMFCs presentaron mayor producción de voltaje y corriente con respecto a Atillo.

La producción de voltaje e intensidad de corriente en las PMFCs de Atillo y San Juan muestran una independencia total con respecto a la temperatura del suelo, sin embargo, en Atillo y San Juan la PMFC1 depende de la temperatura del ambiente y la radiación solar directa para la producción de voltaje, además en San Juan se pudo observar que la generación de voltaje y corriente de la PMFC3 son inversamente proporcionales, el aumento y disminución de voltaje pudo ser causado por factores ambientales como la precipitación, vientos y factores del suelo que no se tomaron en cuenta en esta investigación, sin embargo podemos mencionar que la disminución de voltaje está relacionado con las plantas marchitas, estas no liberan rizo-depósitos (azúcares, aminoácidos, metabolitos, etc.) al medio para los microorganismos, por ende la liberación de electrones disminuye.

RECOMENDACIONES

Implementar investigaciones con plantas de gran capacidad fotosintética, fácil adaptación y de vida corta, en la cual puedan obtener el comportamiento de la producción de bioelectricidad desde su implementación hasta el deceso de la planta.

Analizar la generación de voltaje de las PMFCs y población microbiana al incorporar la materia orgánica cada cierto tiempo durante el ciclo de vida de una planta.

Evaluar la relación de factores ambientales como la precipitación, radiación solar global, velocidad de viento, humedad relativa, presión barométrica y factores químicos-físicos del suelo con la generación de electricidad en la PMFC.

BIBLIOGRAFÍA

ALZATE, L; et al. “Generación de electricidad a partir de una celda de combustible microbiana tipo PEM”. *Interciencia*, vol. 33, n°. 7, (2008), (Venezuela), pp. 503-509.

BIURRUN, F. Como preparar ejemplares de herbario para obtener el nombre botánico de las plantas a través de su envío a especialistas (Informe) (Manual), Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Carrera de Ingeniería de Recursos Naturales Renovables para Zonas Áridas. Laboratorio de Diversidad Vegetal y Fitosociología (La Rioja-España). 2016. p. 4.

BUITRÓN, G. y PÉREZ, J. “Producción de electricidad en celdas de combustible microbianas utilizando agua residual: efecto de la distancia entre electrodos”. *Revista especializada en ciencias químico-biológicas*, vol. 14, n°. 1, (2011) [en línea], [Consulta: 30 junio 2022]. ISSN 1405-888x. Disponible en: <https://www.medigraphic.com/pdfs/revespciequibio/cqb-2011/cqb1111a.pdf>

CAMACHO, M. “Los páramos ecuatorianos: caracterización y consideraciones para su conservación y aprovechamiento sostenible”. *Revista Anales*, vol. 1, n°. 372, (2013) (Ecuador), pp. 77-92. ISSN 1390-7891. DOI <https://doi.org/10.29166/anales.v1i372.1241>

CANARIAS. *Polycarpon tetraphyllum* [Especies Vegetales en Canarias]. 2022. [Consulta: 10 junio 2022]. Disponible en: <https://endemicascanarias.com/index.php/es/allcategories-es-es/67-nativas/1295-polycarpon-tetraphyllum>.

CÁRCER, Í. y CARRAL, P. *Apuntes de Meteorología y Climatología para el Medio Ambiente*. Madrid, España: Ediciones de la Universidad Autónoma de Madrid. 2009. ISBN 9788483440933, pp. 19-75.

CÁRDENAS, M. Evaluación de la calidad de los suelos de páramo intervenidos y no intervenidos en la comunidad Monjas Bajo, parroquia Juan Montalvo, cantón Cayambe (Trabajo de titulación), (Pregrado), Universidad Politécnica Salesiana sede Quito, Carrera de Ingeniería en Biotecnología de los Recursos Naturales. Quito (Quito-Ecuador). 2015. pp. 35-50 [Consulta: 4 abril 2022]. Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/9368/1/UPS-QT07111.pdf>

CARMALIN, S. y SREEJA, S. “Green energy generation from plant microbial fuel cells (PMFC) using compost and a novel clay separator”. *Sustainable Energy Technologies and*

Assessments [en línea], 2017, (India) vol. 21, pp. 59-66 [Consulta: 4 abril 2022]. ISSN 2213-1388. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.seta.2017.05.001>

CASAS, C. y ALARCÓN, M. *Meteorología y clima*. Barcelona. Barcelona, España: Ediciones de la Universidad Politécnica de Catalunya, 1999. ISBN 848301355X, pp. 31-43

CASTILLO, U. “Las celdas de combustible: verdades sobre la generación de electricidad limpia y eficiente vía electroquímica”. *Aplicaciones Tecnológicas*, 1999, vol. 1, pp. 208-209. [Consulta: 4 abril 2022]. Disponible en: https://nanopdf.com/download/las-celdas-de-combustible-verdades-sobre-la-generacion-de_pdf

CEBADA, R. *Energía eléctrica limpia a partir de plantas*. [socialab]. 2017. [Consulta: 29 junio 2022]. Disponible en: <https://comprometidos.socialab.com/challenges/comprometidos2017/idea/44434>

CERRA, H; et al. *Manual de microbiología aplicada a las industrias farmacéuticas, cosmética y de productos médicos*. Argentina: Asociación Argentina de Microbiología. 2013. ISBN 978-987-26716-3-1. [Consulta: 7 abril 2022] Disponible en: <https://www.aam.org.ar/descarga-archivos/manual-microbiologia-aplicada.pdf>

CIRES, E., 2012. *Manual para la recolección de plantas y su herborización*. Oviedo: Universidad de Oviedo, 2012. pp. 1-5. Disponible en: https://herbario.uniovi.es/c/document_library/get_file?uuid=cedc484e-1e46-4a7a-b952-bad7f5bf581a&groupId=3511378

COLADONATO, M. *Trifolium repens*. [U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Fire Sciences Laboratory] 1993. [Consulta: 10 junio 2022]. Disponible en: <http://www.fs.fed.us/database/feis/plants/forb/trirep/all.html>

CORDOBA, U.N. *Guía de actividades prácticas microbiología agrícola*. Córdoba: Universidad Nacional de Córdoba, 2015, pp. 18-19. Disponible en: <http://agro.unc.edu.ar/~microbiologia/wp-content/uploads/2014/04/Guia-de-Trabajos-Practicos.pdf>

ESRÍ. *Modelar la radiación solar*. [ArcGIS Desktop]. 2019. [Consulta: 7 abril 2022]. Disponible en: <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.6/tools/spatial-analyst-toolbox/modeling-solar-radiation.htm>

FIGUEREDO, F; et al. “Celdas de combustible biológicas basadas en el metabolismo fotosintético”. *Química Viva*, vol. 13, n°. 3, (2014), (Argentina) pp. 42-53.

GAMAZO, C; et al. *Manual práctico de microbiología* [en línea]. 3ª ed. Barcelona-España: MASSON, S.A. 2005, pp. 42-85 [Consulta: 15 octubre 2021]. Disponible en: <https://books.google.com.ec/books?id=MfW3TuHLa4gC&pg=PA8&dq=cultivo+microbiano+y+tipos&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwiF1Izr2czzAhWmVzABHQgOCyYQ6AF6BAgFEAI#v=onepage&q&f=true>

GARCÍA, J. *QUÉ ES LA POTENCIA ELÉCTRICA*. [asifunciona]. 2015. [Consulta: 6 octubre 2021]. Disponible en: http://www.asifunciona.com/electrotecnia/ke_potencia/ke_potencia_elect_1.htm

GÓNGORA, A; et al. “Energía: celdas de combustible microbianas”. *Ingeniería*, vol. 21, n°. 1, (2017), (México) pp. 54-62.

GONZALES, M; et al. “Generación de Electricidad a Base de Fotosíntesis”. *Revista de Ciencias Naturales y Agropecuarias*. (2017), (Querétaro) vol. 4, n°. 12, (2017) pp. 5-11.

GUTIÉRREZ, A; et al. *Manual de Microbiología General I*. México: Universidad Autónoma de México, 2020 , Disponible en: https://www.zaragoza.unam.mx/wp-content/Portal2015/Licenciaturas/qfb/manuales/10_MANUAL_MICROBIOLOGIA_GENERAL_I_2020.pdf

HARO, S; et al. “Determinación del comportamiento meteorológico del viento en la provincia de Chimborazo”. *Perfiles*, vol. 1, (2020), (Ecuador) pp. 26-32.

HERBARIVIRTUAL. *Polygonum aviculare L.* [Herbari Virtual del Mediterrani Occidental]. 2022. [Consulta: 10 junio 2022]. Disponible en: [http://herbarivirtual.uib.es/es/general/444/especie/polygonum-aviculare-l-#:~:text=Caracter%C3%ADsticas%3A%20Esta%20es%20una%20hierba,el%20tallo%20\(la%20Oocrea\)](http://herbarivirtual.uib.es/es/general/444/especie/polygonum-aviculare-l-#:~:text=Caracter%C3%ADsticas%3A%20Esta%20es%20una%20hierba,el%20tallo%20(la%20Oocrea))

HERNÁNDEZ, C. “Las energías renovables en la comunidad de Madrid”. *FENERCOM*. vol. 1, (2016), (España) pp. 15-16. Disponible en: <https://www.fenercom.com/wp-content/uploads/2006/08/Energia-Sostenible-en-la-Comunidad-de-Madrid-fenercom-2006.pdf>

HERNÁNDEZ, C. y IBÁÑEZ, R. *Tratamiento De Aguas Residuales Y Generación Simultánea De Energía Eléctrica Mediante Celdas De Combustible Microbianas*. Colombia: Universidad Nacional de Colombia, 2010. ISBN: 978-958-719-569-9

HERNÁNDEZ, R; et al. *Metodología de la investigación*. 6ª ed. Santa Fe, México: McGraw Hill, 2014. ISBN 9781456223960, pp. 25-46

HOFSTEDE, R; et al. *Los Paramos del Mundo. Proyecto Atlas Mundial de los Paramos*. Quito, Ecuador: Global Peatland Initiative/NC-IUCN/EcoCiencia. 2004, ISBN: 9978-43-505-0 [Consulta: 30 junio 2022]. Disponible en: <https://biblio.flacsoandes.edu.ec/libros/digital/56486.pdf>

IGAC, INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI. *Guía de Muestreo*. [IGAC], 2022. [Consulta: 7 noviembre 2021]. Disponible en: <https://docs.google.com/viewer?url=https%3A%2F%2Fwww.igac.gov.co%2Fsites%2Figac.gov.co%2Ffiles%2Fguiademuestreo.pdf&pdf=true>

INECOL, INSTITUTO DE ECOLOGÍA A.C. *Las bacterias que ayudan a las plantas a crecer*. [INECOL], 2017. [Consulta: 21 julio 2022]. Disponible en: <https://www.inecol.mx/inecol/index.php/es/2017-06-26-16-35-48/17-ciencia-hoy/1360-las-bacterias-que-ayudan-a-las-plantas-a-crecer>

JARAMILLO, N; et al. *Proceso de Recolección de Especímenes Botánicos*. Universidad Nacional de Loja, 2020, Ecuador, pp- 5-9 [Consulta: 7 abril 2022]. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Zhofre-Aguirre/publication/341879060_PROCESO_DE_COLECCION_DE_ESPECIMENES_BOTANICOS/links/5ed7c567299b1c67d353a79/PROCESO-DE-COLECCION-DE-ESPECIMENES-BOTANICOS.pdf

KABUTEY, F.T; et al. “An overview of plant microbial fuel cells (PMFCs): Configurations and applications”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 110 (2019), (China) pp. 402–414

KHUDZARI, J. Bioelectricity production in compost, soil, and plant microbial fuel cells (Trabajo de titulación), (Doctorado), McGill University, Department of Bioresource Engineering, Faculty of Agricultural and Environmental. (Québec-Canada). 2018. pp. 43-56.

KIRAN, V; et al. “Resource recovery from paddy field using plant microbial fuel cell”. *Process Biochemistry* vol. 99. (2020), (India) pp. 270-281. ISSN 1359-5113. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2020.09.015>

LARA, M; et al. “Aprovechamiento de energía luminosa para la generación de bioelectricidad a través de plantas ornamentales”. *Materia, Ciencia y Nanociencia*, vol. 3, n°. 1 (2020), (México) p. 14.

LLAMBÍ, L.D; et al. *Páramos Andinos Ecología, hidrología y suelos de páramos*. Quito, Ecuador: 2012. ISBN: 9789942115492 pp. 194. [Consulta: 30 junio 2022]. Disponible en: <https://biblio.flacsoandes.edu.ec/libros/digital/56480.pdf>

LOGROÑO, W. Producción de bioelectricidad microbiana utilizando residuos orgánicos como sustrato, para dos casos de estudio: Andes-Amazonia, Ecuador. (Trabajo de titulación), (Pregrado), Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ciencias, Carrera de Ingeniería en Biotecnología Ambiental (Riobamba-Ecuador). 2014, pp. 26-27. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/3156/1/236T0085.pdf>

MADIGAN, M; et al. *Brock Biología de Los microorganismos*. 12ª ed. Madrid, España: Persaon Educación, 2009. ISBN 9788478291366, pp. 35-60.

MANACORDA, A; et al. *Manual Práctico de MICROBIOLOGIA AMBIENTAL I*. 2ª ed. Buenos Aires, Argentina: Departamento de Ciencias del Ambiente. 2007, pp. 65-78.

MENA, P. y MEDINA, G. *Los suelos del páramo*. Quito, Ecuador: Abya Yala, 2000. ISSN 1390-1222, [Consulta: 30 junio 2022]. Disponible en: <https://es-static.z-dn.net/files/d5c/a9751b4293c82c26ef428db85b953254.pdf>

MENDOZA, R. y ESPINOSA, A. *Guía Técnica para Muestreo de Suelos*. Managua, Nicaragua: Universidad Nacional Agraria y Catholic Relief Services (CRS), 2017. [Consulta: 7 noviembre 2021]. Disponible en: <https://repositorio.una.edu.ni/3613/1/P33M539.pdf>
Microbiología Ambiental. Perú: Universidad Continental, 2020. Disponible en: https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/3227/8/DO_FIN_108_GL_ASUC_00594_2020.pdf

MINISTERIO DE AMBIENTE. *Guía de inventario de la flora y vegetación. Guía de inventario de la flora y vegetación*. Lima: Ministerio del Ambiente. Dirección General de Evaluación,

Valoración y Financiamiento del Patrimonio Natural, 2015 [Consulta: 20 octubre 2021]. Disponible en: https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/155205/07_guia-a-de-flora-y-vegetacion.pdf

MINISTERIO DEL AMBIENTE. *Guía para el muestreo de suelos.* Perú: Ministerio del Ambiente, 2014 [Consulta: 7 abril 2022]. Disponible en: <https://www.minam.gob.pe/calidadambiental/wp-content/uploads/sites/22/2013/10/GUIA-PARA-EL-MUESTREO-DE-SUELOS-final.pdf>

MOQSUD, M; et al. Compost in plant microbial fuel cell for bioelectricity generation. *Waste Management*, vol. 36, Japón, pp. 63-69. DOI <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.11.004>

MOQSUD, M. A; et al. Compost in plant microbial fuel cell for bioelectricity generation. *Waste Management*, vol. 36, (2015), (Japón), pp. 63-69. ISSN 18792456. DOI <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.11.004>

MORALES, A. Diseño y experimentación de un prototipo para la generación de energía eléctrica no convencional mediante el proceso fotosintético de plantíos (Trabajo de titulación), (Pregrado). Universidad de la Salle, Facultad de Ingeniería, Ingeniería eléctrica. (Bogotá-Colombia). 2020. pp. 41-55. Disponible en: https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1603&context=ing_electrica

MORENO, E. “El herbario como recurso para el aprendizaje de la botánica”. *Acta Botánica Venezuelica*, vol. 30, n°. 1, (2007), (Venezuela) pp. 415-427. [Consulta: 22 noviembre 2021]. ISSN 0084-5906. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/862/86230209.pdf>

MUELLER-DOMBOIS, D. y ELLENBERG, H. *Aims and Methods of Vegetation Ecology.* Geographical Review New York, Estados Unidos: John Wiley & Sons, 1974. pp. 45-66. [Consulta: 20 octubre 2021] Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/259466952_Aims_and_Methods_of_Vegetation_Ecology

OPS (ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD). Peligros Biológicos: Inocuidad de Alimentos-Control Sanitario-HACCP. Washington, Estados Unidos: Organización Panamericana de la Salud. 2015. [Consulta: 21 julio 2022]. Disponible en: https://www3.paho.org/hq/index.php?option=com_content&view=article&id=10838:2015-peligros-biologicos&Itemid=41432&lang=es

PANT, D; et al. “A review of the substrates used in microbial fuel cells (MFCs) for sustainable energy production”. *Bioresource Technology*, vol. 101, n°. 6, (2010), (Bélgica). pp. 1533-1543. ISSN 09608524. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2009.10.017>

PL@NTNET. *Drymaria cordata (L.)* [Willd. ex Schult., Matemaco (Flora mundial)]. Pl@ntNet identify, 2014. [Consulta: 10 junio 2022]. Disponible en: [https://identify.plantnet.org/es/the-plant-list/species/Drymaria%20cordata%20\(L.\)%20Willd.%20ex%20Schult./data](https://identify.plantnet.org/es/the-plant-list/species/Drymaria%20cordata%20(L.)%20Willd.%20ex%20Schult./data)

PORTALFRUTICOLA. *Plant-e: Generación de energía con plantas vivas.* [Portalfrutícula]. Las Condes, Portalfruticola.com. 2020, [Consulta: 29 junio 2022]. Disponible en: <https://www.portalfruticola.com/noticias/2020/07/30/plant-e-generacion-de-energia-con-plantas-vivas/>

RODRÍGUEZ, R; et al. *Meteorología y climatología.* España: Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología, 2004. ISBN 8468885355, pp. 25-36.

SÁNCHEZ, A. y GONZÁLEZ, M., 2007. *Técnicas de Recolección de Plantas y Herborización.* La Sistemática, Base del Conocimiento de la Biodiversidad, pp. 123-133. [Consulta: 22 noviembre 2021]. ISBN 970-769-099-2. Disponible en: <https://www.uaeh.edu.mx/investigacion/productos/6082/Capitulo12.pdf>

SCHAMPHELAIRE, L; et al. “Microbial Fuel Cells Generating Electricity from Rhizodeposits of Rice Plants”. *National Library of Medicine* vol. 42, n°. 8, (2008), (Belgium) pp. 3053-3058. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/18497165/#:~:text=An%20electrical%20current%20was%20generated,presence%20of%20actively%20growing%20plants.>

SOPHIA, A.C. y SREEJA, S. “Green energy generation from plant microbial fuel cells (PMFC) using compost and a novel clay separator”. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 21, (2017), (India) pp. 59-66, DOI <https://doi.org/10.1016/j.seta.2017.05.001>

STOHLGREN, T.J; et al. “A Modified-Whittaker nested vegetation sampling method”. *Vegetatio.* vol. 117, (1995), (Belgium) pp. 113-121. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00045503>

SUTHERLAND, W. *Ecological Census Techniques.* 2ª ed. 2006. [Consulta: 20 octubre 2021]. Disponible en: <https://doi.org/10.1111/j.1442-9993.2007.01808.x>

TETTEH, F; et al. “An overview of plant microbial fuel cells (PMFCs): Configurations and applications”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 110, (2019), (China), pp. 402-414. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.05.016>

TORRES, L; et al. “Uso de curvas de polarización para entender el transporte de iones a través de una membrana de intercambio iónico”. *Educación química*, vol. 30, n°. 4, (2019), (México) pp. 6-15. Disponible en: <https://doi.org/10.22201/fq.18708404e.2019.4.67333>

CHUET-MISSÉ, J. *Las plantas también pueden ser fuente de electricidad*. [LA VANGUARDIA] 2017, [Consulta: 29 junio 2022]. Disponible en: <https://www.lavanguardia.com/natural/20170118/413415278331/planta-electricidad.html>

UEB. *Recolecta de plantas y herborización*. Universidad Autónoma de Ciudad de Juárez, 2015 [Consulta: 22 noviembre 2021]. Disponible en: <https://www.uacj.mx/ICB/UEB/documentos/9Herborizacion.pdf>

UETMM. *Hypochaeris sessiliflora* [flickr]. Unidad Educativa Técnica Mitad del Mundo, 2017 [Consulta: 10 junio 2022]. Disponible en: <https://www.flickr.com/photos/154043720@N05/46224381241>

UETMM. *POLEO AZUL: Hyptis eriocephala* [floradelamitadeldmundo]. Repositorio Digital: Flora de la Mitad del Mundo, UETMM. 2020. [Consulta: 10 junio 2022]. Disponible en: <https://floradelamitadeldmundo.wordpress.com/2020/08/23/01505-poleo-azul-hyptis-eriocephala/>

ULLOA, C. “Aromas y sabores andinos”. *Botánica Económica de los Andes Central*. (2006), (San Andrés, La Paz) pp. 313-328 Disponible en: <http://www.missouribotanicalgarden.org/Portals/0/staff/PDFs/ulloa/Aromas.pdf>

VANEGAS, M; et al. “Cálculo de las radiaciones total, directa y difusa a través de la transmisibilidad atmosférica en los departamentos del Cesar, La Guajira y Magdalena (Colombia)”. *ESPACIOS*, vol. 38, n°. 7, (2017), (Colombia), p. 3. ISSN 07981015. Disponible en: <https://repositorio.cuc.edu.co/bitstream/handle/11323/1998/C%C3%A1lculo%20de%20las%20radiaciones%20total%2C%20directa%20y%20difusa%20a%20trav%C3%A9s%20de%20la%20transmisibilidad%20atmosf%C3%A9rica%20en%20los%20departamentos%20del%20Cesar%2>

[C%20La%20Guajira%20y%20Magdalena%20%28Colombia%29.pdf?sequence=3&isAllowed=y](#)

ZAPIEN, J; et al. “Generación Eléctrica a Partir de la Fotosíntesis Natural; ¿Una Realidad Escalable?”. *Revista de Energías Renovables*, vol. 3, n°. 1, (2019), (México) pp. 1-6. Disponible en:

https://www.ecorfan.org/republicofperu/research_journals/Revista_de_Energias_Renovables/volumen10/Revista_de_Energ%C3%ADas_Renovables_V3_N10_1.pdf

ZÚÑIGA, I y ARCO, E. *Meteorología y Climatología*. Madrid-España: Universidad Nacional de Educación a Distancia: 2015. ISBN 9788436260076. pp. 32-55.

ANEXOS

ANEXO A: CONTEO DE LAS ESPECIES DE PLANTAS EN UN ÁREA DE 1M2



ANEXO B: RECOLECCIÓN DE EJEMPLARES DE CADA ESTACIÓN METEOROLÓGICA



ANEXO C: PRENSADO DE LOS EJEMPLARES RECOLECTADOS



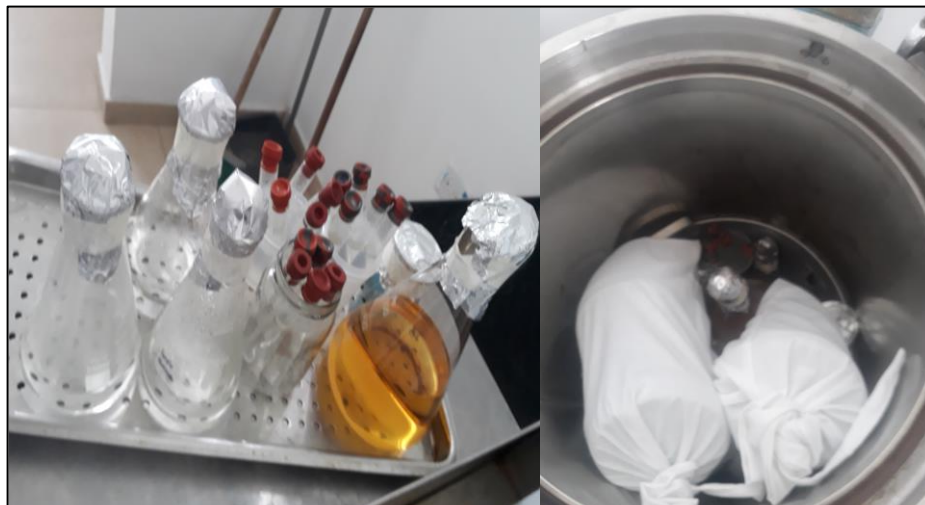
ANEXO D: IDENTIFICACIÓN DE LOS EJEMPLARES



ANEXO E: EXTRACCIÓN DE LA MUESTRA DE SUELO



ANEXO F: PREPARACIÓN DE MEDIOS DE CULTIVO Y ESTERILIZACIÓN DE LOS MATERIALES



ANEXO G: DILUCIONES SERIADAS DE LAS MUESTRAS DE SUELO DE ATILLO, SAN JUAN, MULTITUD Y AÑA MOYOCANCHA



ANEXO H: SIEMBRA DE LAS DILUCIONES DE 10-3 HASTA LA 10-6 DE LAS MUESTRAS DE LAS PMFC



ANEXO I: CONTEO DE LOS MICROORGANISMOS EN LAS CAJAS PETRI



ANEXO J: CÁLCULOS REALIZADOS PARA DETERMINAR LAS UFC/ML DE LAS PMFC

ETAPA INICIAL									
IMPLEMENTACION DE PMFC EN LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS DE CHIMBORAZO (UFC en 0.1 ml)									
Estacion meteorológica	Muestra	C1: 10E-3	C2: 10E-3	C1: 10E-4	C2: 10E-4	C1: 10E-5	C2: 10E-5	C1: 10E-6	C2: 10E-6
Atillo	M1	103	108	46	38	4	6	2	1
San Juan	M2	624	408	59	81	13	14	6	5
Multitud	M3	107	204	61	57	29	25	6	4
Aña Moyocancha	M4	228	240	35	36	22	34	12	10
PROMEDIO DE LAS DILUCIONES									
Muestra	10 [^] (-3)	10 [^] (-4)	10 [^] (-5)	10 [^] (-6)					
M1	105,5	42	5	1,5					
M2	516	70	13,5	5,5					
M3	155,5	59	27	5					
M4	234	35,5	28	11					
UFC/ml									
Muestra	10 [^] (-3)	10 [^] (-4)	10 [^] (-5)	10 [^] (-6)					
M1	1,06E+06	4,20E+06	5,00E+06	1,50E+07					
M2	5,16E+06	7,00E+06	1,35E+07	5,50E+07					
M3	1,56E+06	5,90E+06	2,70E+07	5,00E+07					
M4	2,34E+06	3,55E+06	2,80E+07	1,10E+08					
ETAPA FINAL									
MUESTRA DE SUELO DE PMFC DE ATILLO (UFC en 0,1 ml)									
Ubicación	Muestra	C1: 10E-3	C2: 10E-3	C1: 10E-4	C2: 10E-4	C1: 10E-5	C2: 10E-5	C1: 10E-6	C2: 10E-6
Suelo	PMFC1	298	290	84	92	11	17	2	7
Suelo	PMFC2	284	348	86	81	14	8	1	1
Maceta	PMFC3	274	215	46	71	10	11	8	2
PROMEDIO DE LAS DILUCIONES									
Muestra	10 [^] (-3)	10 [^] (-4)	10 [^] (-5)	10 [^] (-6)					
PMFC1	294	88	14	4,5					
PMFC2	316	83,5	11	1					
PMFC3	244,5	58,5	10,5	5					
UFC/ml									
Muestra	10 [^] (-3)	10 [^] (-4)	10 [^] (-5)	10 [^] (-6)					
PMFC1	2,94E+06	8,80E+06	1,40E+07	4,50E+07					
PMFC2	3,16E+06	8,35E+06	1,10E+07	1,00E+07					
PMFC3	2,45E+06	5,85E+06	1,05E+07	5,00E+07					
MUESTRA DE SUELO DE PMFC DE SAN JUAN (UFC en 0,1 ml)									
Ubicación	Muestra	C1: 10E-3	C2: 10E-3	C1: 10E-4	C2: 10E-4	C1: 10E-5	C2: 10E-5	C1: 10E-6	C2: 10E-6
Suelo	PMFC1	784	804	149	156	73	78	11	4
Suelo	PMFC2	512	536	197	184	40	34	29	24
Maceta	PMFC3	416	492	251	224	43	52	27	17
PROMEDIO DE LAS DILUCIONES									
Muestra	10 [^] (-3)	10 [^] (-4)	10 [^] (-5)	10 [^] (-6)					
PMFC1	794	152,5	75,5	7,5					
PMFC2	524	190,5	37	26,5					
PMFC3	454	237,5	47,5	22					
UFC/ml									
Muestra	10 [^] (-3)	10 [^] (-4)	10 [^] (-5)	10 [^] (-6)					
PMFC1	7,94E+06	1,53E+07	7,55E+07	7,50E+07					
PMFC2	5,24E+06	1,91E+07	3,70E+07	2,65E+08					
PMFC3	4,54E+06	2,38E+07	4,75E+07	2,20E+08					

ANEXO K: IMPLEMENTACIÓN DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE MICROBIANO TIPO PLANTA CON EL RESPECTIVO EJEMPLAR ABUNDANTE DE CADA ESTACIÓN METEOROLÓGICA



Atillo



San Juan



Multitud



Aña Moyocancha

ANEXO L: CONEXIÓN DE LAS PMFC AL RECOLECTOR DE DATOS



ANEXO M: PROGRAMACIÓN UTILIZADA PARA RECOLECTAR DATOS DE LA GENERACIÓN DE BIOELECTRICIDAD

```

LED_MN$
File Edit Sketch Tools Help

LED_MN$.ino
#include <SPI.h>
#include <SD.h>

#define SSpin 10

File archivo;
float VP1 = 0;
float CP1 = 0;
float VP2 = 0;
float CP2 = 0;
float VP3 = 0;
float CP3 = 0;
int led = 8;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pinMode(led, OUTPUT);
  analogReference(DEFAULT);
  Serial.println("Inicializando tarjeta ...");
  if (!SD.begin(SSpin)) {
    Serial.println("Fallo en inicializacion!");
    return;
  }
  Serial.println("Inicializacion correcta");
  archivo = SD.open("datos.txt", FILE_WRITE);

  if (archivo) {
    for (int i=1; i < 10800; i++){
      digitalWrite(led, HIGH);
      delay(200);
      digitalWrite(led, LOW);

      VP1 = analogRead(A1);
      CP1 = analogRead(A3);
      VP2 = analogRead(A3);
      ...
    }
  }
}

```

ANEXO N: ESQUEMA DE LAS CONEXIONES DE LAS PMFC

