UNIVERSIDAD NACIONAL DE UCAYALI

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES Y AMBIENTALES

CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

DETERMINACIÓN DE LA CANTIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE ELECTRONES LIBRES, PRODUCTO DE LA ACTIVIDAD METABÓLICA DE LOS MICROORGANISMOS, EN LAS PLANTAS DE PALMA ACEITERA (*Elaeis guineensis*), CACAO (*Theobroma cacao*) Y CÉSPED TOROURCO (*Axonopus compresus*), EN LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE UCAYALI, REGIÓN UCAYALI, 2017

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE

INGENIERO AMBIENTAL

EDWAR EDINSON RUBINA ARANA

PUCALLPA – PERÚ

2020

UNIVERSIDAD NACIONAL DE UCAYALI
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES Y AMBIENTALES
CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

COMISIÓN DE GRADOS Y TÍTULOS

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS N° 104

En el auditorio de la Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales de la UNU, siendo las 13:10 horas a.m. del día miércoles 13 de noviembre del 2019, se reunieron los miembros del jurado evaluador designado con memo múltiple 078-2019-UNU-FCFyA-CGT conformando por los siguientes docentes:

Dr. Edgar Juan Díaz Zúñiga	Presidente
Ing. M. Sc. Pedro Aparicio Campos Cabrera	Miembro
Lic. M. Sc. Desiderio Vásquez Placido	Miembro

Para evaluar la sustentación de la tesis titulada **"DETERMINACIÓN DE LA CANTIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE ELECTRONES LIBRES, PRODUCTO DE LA ACTIVIDAD METABÓLICA DE LOS MICROORGANISMOS, EN LAS PLANTAS DE PALMA ACEITERA *(Elaeis guineensis)*, CACAO *(Theobroma cacao)* Y CÉSPED TOROURCO *(Axonopus compresus)*, EN LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE UCAYALI, REGIÓN UCAYALI, 2017"**. Presentado por el bachiller **EDWAR EDINSON RUBINA ARANA**.

Terminada la sustentación se procedió a la formulación de preguntas de parte del jurado, siendo absuelto satisfactoriamente por el sustentante. Por esta razón el jurado **APROBÓ** la tesis por **UNANIMIDAD** con el calificativo de **BUENO**, en consecuencia, el sustentante está **EXPEDITO** para obtener el título de **INGENIERO AMBIENTAL**, siendo asesor el **Dr. GROBER PANDURO PISCO**.
Siendo las 14:30 p.m. del mismo día, se dio por concluida el acto académico.

Dr. Edgar Juan Díaz Zúñiga
PRESIDENTE

Ing. M.Sc. Pedro Aparicio Campos Cabrera
MIEMBRO

Lic. M. Sc. Desiderio Vásquez Placido
MIEMBRO

ACTA DE APROBACIÓN

Esta tesis fue sometida a consideración para su aprobación ante el Jurado de la Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales de la Universidad Nacional de Ucayali

Dr. Edgar Juan Díaz Zúñiga

Presidente

Ing. M. Sc. Pedro Aparicio Campos Cabrera

Miembro

Lic. M. Sc. Desiderio Vásquez Placido

Miembro

Dr. Grober Panduro Pisco

Asesor

Ing. Jesús Cotrina Barrueta

Co – Asesor

Bach. Edwar Edinson Rubina Arana

Tesista

UNIVERSIDAD NACIONAL DE UCAYALI
VICERRECTORADO DE INVESTIGACION
DIRECCION GENERAL DE PRODUCCION INTELECTUAL

CONSTANCIA

ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE INVESTIGACION

SISTEMA ANTIPLAGIO URKUND

N°096-2020

La **Dirección General de Producción Intelectual**, hace constar por la presente, que el Informe Final (Tesis), titulado:

DETERMINACIÓN DE LA CANTIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE ELECTRONES LIBRES, PRODUCTO DE LA ACTIVIDAD METABÓLICA DE LOS MICROORGANISMOS, EN LAS PLANTAS DE PALMA ACEITERA (*Elaeis guineensis*), CACAO (*Theobroma cacao*) Y CÉSPED TOROURCO (*Axonopus compresus*), EN LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE UCAYALI, REGIÓN UCAYALI, 2019.

Cuyo autor (es)	:	**RUBINA ARANA, EDWAR EDINSON**
Facultad	:	CIENCIAS FORESTALES Y AMBIENTALES
Escuela Profesional	:	INGENIERIA AMBIENTAL
Asesor	:	Dr. Panduro Pisco, Grober

Después de realizado el análisis correspondiente en el Sistema Antiplagio URKUND, dicho documento presenta un **porcentaje de similitud de 05%.**

En tal sentido, de acuerdo a los criterios de porcentaje establecidos en el artículo 9 de la DIRECTIVA DE USO DEL SISTEMA ANTIPLAGIO URKUND, el cual indica que no se debe superar el 10%. Se declara, que el trabajo de investigación: SI Contiene un porcentaje aceptable de similitud, por lo que SI se aprueba su originalidad.

En señal de conformidad y verificación se FIRMA Y SELLA la presente constancia.

Fecha: 26/02/2020

UNIVERSIDAD NACIONAL DE UCAYALI
DIRECCION GENERAL DE PROPIEDAD INTELECTUAL
DRA. EDNA PARI QUISPE
Direc. Gral Prod Intel

REPOSITORIO DE TESIS DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE UCAYALI
AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN DE TESIS

Yo, EDWAR EDINSON RUBINA ARANA

Autor de la TESIS titulada:

"DETERMINACIÓN DE LA CANTIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR ELECTRONES LIBRES, PRODUCTO DE LA ACTIVIDAD METABÓLICA DE LOS MICROORGANISMOS, EN LAS PLANTAS DE PALMA ACEITERA (*Elaeis guineensis*), CACAO (*Theobroma cacao*). Y CÉSPED TOROURCO (*Axonopus compresus*), EN LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE UCAYALI, REGIÓN UCAYALI, 2017".

Sustentada el año: 2019

Con la asesoría de: Dr. GROBER PANDURO PISCO

En la Facultad de: CIENCIAS FORESTALES Y AMBIENTALES

Carrera Profesional de: INGENIERTA AMBIENTAL

Autorizo la publicación de mi trabajo de investigación en el Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de Ucayali, bajo los siguiente términos: Primero: otorgo a la Universidad Nacional de Ucayali licencia no exclusiva para reproducir, distribuir, comunicar, transformar (únicamente mediante su traducción a otros idiomas) y poner a disposición del público en general mi tesis (incluido el resumen) a través del Repositorio Institucional de la UNU, en forma digital sin modificar su contenido, en el Perú y en el extranjero; por el tiempo y las veces que considere necesario y libre de remuneraciones.

Segundo: declaro que la tesis es una creación de mi autoría y exclusiva titularidad, por tanto me encuentro facultado a conceder la presente autorización, garantizando que la tesis no infringe derechos de autor de terceras personas. Tercero: autorizo la publicación,

- [x] Total (significa que todo el contenido de la tesis en PDF será compartido en el repositorio).
- [ ] Parcial (significa que solo la carátula, la dedicatoria y el resumen en PDF serán compartidos en el repositorio).

De mi TESIS de investigación en la página web del Repositorio Institucional de la UNU.

En señal de conformidad firma la presente autorización.

Fecha: 19 / 06 / 2020

Email: eera.rubina@gmail.com

Firma: 

Teléfono: 985 768 335

DNI: 48714479

DEDICATORIA

A יהוה (Yahweh)

Por haberme otorgado su misericordia, amor, conocimiento y sabiduría para alcanzar los objetivos de la investigación a favor de los vulnerables en energía eléctrica.

A mi madre Isabel

Por blindarme de amor, influyente en valores, consejos y por constante motivación que ha logrado formar un hombre de bien.

A mi padre Hugo

Por el ejemplo de vida, el apoyo que en todo momento me ha brindado para alcanzar mis objetivos.

A mis hermanos

Florencio, Erol, Edson, Esthefany, María, Juan y Bill; por el abrigo fraternal, apoyo que en todo momento actuaron como el impulso que ha permito mejorar en todo momento.

AGRADECIMIENTO

A la señorita Arli, por el apoyo en el desarrollo de la tesis, en valores y sobre todo el impulso brindado que ha permitido acercarnos más espiritualmente a nuestro Padre.

De manera especial a mis asesores de tesis, por apoyar el desarrollo y guiar la ejecución por procesos, hasta llegar a la obtención del título profesional, también expresarle mi gratitud por permitir desarrollarme profesionalmente y seguir cultivando el mundo de investigación e innovación.

A la Universidad Nacional Ucayali, por haberme formado académicamente y por las oportunidades del desarrollo de la investigación y contribución en marco de las nuevas fuentes de energías.

A la Universidad Nacional Agraria de la Selva, por el apoyo en el análisis de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del suelo.

ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA....vi
AGRADECIMIENTO....vii
ÍNDICE DE CONTENIDO....viii
ÍNDICE DE TABLAS....xi
ÍNDICE DE FIGURAS....xiv
RESUMEN....xvi
ABSTRACT....xvii
INTRODUCCIÓN....1
CAPÍTULO I....3
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA....3
1.1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA....4
1.1.1. General....4
1.1.2. Específico....4
1.2. OBJETIVOS....4
1.2.1. General....4
1.2.2. Específicos....5
1.3. HIPÓTESIS....5
1.3.1. Hipótesis alternativa (Ha)....5
1.3.2. Hipótesis Nula (H0)....5
1.4. COMPONENTES ESTUDIADOS....5
1.4.1. Variables independientes....5
1.4.2. Variables dependientes....5
CAPÍTULO II....6
MARCO TEÓRICO....6
2.1. ANTECEDENTES DEL PROBLEMA....6
2.1.1. Internacional....6
2.1.2. Nacional....11
2.2. BASES TEÓRICAS....11
2.2.1. Energía....11
2.2.2. Fuentes de energía....11
2.2.3. Electricidad, corriente eléctrica y energía eléctrica....12
2.2.4. Electroquímica....13
2.2.5. Celdas galvánicas....14
2.2.6. Celdas de combustible microbianas....15

2.2.7. Plantas 17
2.2.7.2. Raíz y exudados radiculares 18
2.2.7.3. Interacciones en la rizosfera de las plantas 20
2.2.7.4. Palma Aceitera (*Elaeis guineensis*) 20
2.2.7.5. Cacao (*Thebroma cacao*) 21
2.2.7.6. Césped Torourco (*Axonopus compressus*) 22
2.2.7.7. Relaciones suelo-planta en la nutrición 23
2.2.8. Suelo 24
2.2.8.1. Propiedades físicas 24
2.2.8.2. Propiedades químicas 25
2.2.8.3. Microorganismos del suelo 29
2.2.9. Electrodos 33
2.2.9.1. Cátodo 34
2.2.9.2. Ánodo 35
2.2.10. Cálculos para la obtención de energía eléctrica en las bioceldas 36
2.3. Definición de términos básicos 44
CAPÍTULO III 46
3.1. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN 46
3.2. UBICACIÓN, POBLACIÓN Y MUESTRA 46
3.2.1. Ubicación del estudio 46
3.2.2. Población 47
3.2.3. Muestra 48
3.3. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN 48
3.4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO 49
3.5. INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS 49
3.6. PROCEDIMIENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS 50
3.6.1. Adquisición de los materiales, equipos, herramientas e insumos 50
3.6.2. Selección del área y acondicionamiento del lugar de trabajo 51
3.6.3. Selección de las muestras para la instalación del sistema de bioceldas 52
3.6.4. Diseño y construcción de bioceldas 52
3.6.5. Instalación de la biocelda experimental y electrodos 55
3.6.6. Medición de parámetros y toma de datos de las bioceldas 58
3.6.7. Cuantificación del rendimiento o capacidad de la biocelda 61
3.6.8. Análisis e interpretación de datos 61
CAPÍTULO IV 62
RESULTADOS Y DISCUSIÓN 62

Energía eléctrica a partir de electrones libres, producto de la actividad metabólica de los microorganismos, en las plantas de palma aceitera (Elaeis guineensis), cacao (Theobroma cacao) y césped torourco (Axonopus compresus) 62

4.1. Estrato vegetativo, electrodos, horario de medida, condiciones del suelo que propicia una mejor en la generación de electrones libres 64

4.1.1. Estrato vegetativo, electrodos y horario de medida según voltaje y corriente 64

4.1.2. Condiciones que favorecen el aporte de energía eléctrica 68

4.2. Capacidad de las celdas de combustibles microbianas por área (W/m2) y el grado de resistencia a las reacciones REDOX del Grafito y Cobre como ánodo (+), del Alambre Galvanizado y Aluminio como cátodo (-), en la rizosfera 73

4.3. Costo producción de energía eléctrica con bioceldas para un celular, laptop, casa en zona rural y urbana 76

CAPÍTULO V 78

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 78

5.1. Conclusiones 78

5.2. Recomendaciones 79

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 80

ANEXOS 88

Anexo 1: Tabla de resultados estadísticos 89

Anexo 2: Promedios de parámetros eléctricos en tres estratos y un testigo con electrodos de Cobre y Aluminio 106

Anexo 3: Promedios de parámetros eléctricos en tres estratos y un testigo con electrodos de Grafito y Alambre Galvanizado 109

Anexo 4: Cálculo de demanda de energía y costo con bioceldas 112

Anexo 5: Panel fotográfico 116

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Compuestos orgánicos detectados en exudados de raíz de plantas……..	19
Tabla 2.	Cantidad de arena, limo y arcilla, y clase textural del suelo de la Universidad Nacional de Ucayali…….	25
Tabla 3.	Densidad aparente, real y porcentaje de porosidad de los suelos de la Universidad Nacional de Ucayali…….	25
Tabla 4.	pH a diferentes profundidades según horizonte del suelo de Yarinacocha……	26
Tabla 5.	Conductividad eléctrica, capacidad de intercambio catiónico a diferentes profundidades, según horizonte del suelo de Yarinacocha……	27
Tabla 6.	Cationes intercambiables, % de saturación de Aluminio a diferentes profundidades, según horizonte del suelo de Yarinacocha……	27
Tabla 7.	Carbono orgánico, nitrógeno total y relación C/N, a diferentes profundidades, según horizonte del suelo de Yarinacocha…….	28
Tabla 8.	Resistividades y coeficientes de temperatura de resistividad para varios materiales…….....	38
Tabla 9.	Coordenadas del área de estudio……...	46
Tabla 10.	Enegía eléctrica generada en los diferentes estratos vegetativos y electrodos…….	62
Tabla 11.	Parámetros físicos del suelo……	68
Tabla 12.	Parámetros químicos del suelo…….	69
Tabla 13.	Parámetros microbiológicos del suelo……	71
Tabla 14.	Parámetros atmosféricos……..	72
Tabla 15.	Costo de producción de energía eléctrica con bioceldas, según la demanda……..	77
Tabla 16.	Prueba de ANOVA para la energía eléctrica obtenido con Grafito y A. Galvanizado…….	89
Tabla 17.	Prueba de HSD Tukey de Subconjuntos homogéneos para la energía eléctrica. obtenido con Grafito y A. Galvanizado……	89
Tabla 18.	Prueba de ANOVA para la energía eléctrica obtenido con Cobre y Aluminio……	89
Tabla 19.	Prueba de HSD Tukey de Subconjuntos homogéneos para la energía eléctrica obtenido con Cobre y Aluminio…….	89
Tabla 20.	Prueba de T de Student para la energía eléctrica en Suelo libre, Césped Torourco, Cacao y Palma Aceitera con electrodos diferentes, Grafito + A. Galvanizado y Cobre + Aluminio……	90
Tabla 21.	Prueba de T de Student para el voltaje en Suelo libre, Césped Torourco, Cacao y Palma Aceitera con electrodos diferentes, Grafito + A. Galvanizado y Cobre + Aluminio……	91

Tabla 22.	Prueba de T de Student para la corriente en Suelo libre, Césped Torourco, Cacao y Palma Aceitera con electrodos diferentes, Grafito + A. Galvanizado y Cobre + Aluminio……	92
Tabla 23.	Prueba de ANOVA para el voltaje en Suelo libre, Césped Torourco, Cacao y Palma Aceitera, con electrodos de Grafito y A. Galvanizado……	93
Tabla 24.	Prueba de Tukey HSD para voltaje en Suelo libre, Césped Torourco, Cacao y Palma Aceitera, con electrodos de Grafito y A. Galvanizado……	93
Tabla 25.	Prueba de ANOVA para la corriente en Suelo libre, Césped Torourco, Cacao y Palma Aceitera, con electrodos de Grafito y A. Galvanizado……	93
Tabla 26.	Prueba de Tukey HSD para corriente en Suelo libre, Césped Torourco, Cacao y Palma Aceitera, con electrodos de Grafito y A. Galvanizado……	94
Tabla 27.	Prueba de ANOVA para voltaje en Suelo libre, Césped Torourco, Cacao y Palma Aceitera, con electrodos de Cobre y Aluminio…..	94
Tabla 28.	Prueba de ANOVA para la corriente en Suelo libre, Césped Torourco, Cacao y Palma Aceitera, con electrodos de Cobre y Aluminio……...	94
Tabla 29.	Análisis correlacional de spearman de las variables……	95
Tabla 30.	Análisis correlacional de pearson de parámetros físicos del suelo	96
Tabla 31.	Análisis correlacional de pearson de parámetros químicos del suelo…….	97
Tabla 32.	Análisis correlacional de pearson de parámetros microbiológicos del suelo……..	100
Tabla 33.	Análisis correlacional de pearson de los parámetros atmosféricos	102
Tabla 34.	Prueba de ANOVA para la potencia en Suelo libre, Césped Torourco, Cacao y Palma Aceitera, con electrodos de Grafito y A. Galvanizado……	103
Tabla 35.	Prueba de Tukey HSD para la de potencia en Suelo libre, Césped Torourco, Cacao y Palma Aceitera, con electrodos de Grafito y A. Galvanizado……	103
Tabla 36.	Prueba de ANOVA para la densidad de potencia en Suelo libre, Césped Torourco, Cacao y Palma Aceitera, con electrodos de Grafito y A. Galvanizado……	104
Tabla 37.	Prueba de Tukey HSD para la densidad de potencia en Suelo libre, Césped Torourco, Cacao y Palma Aceitera, con electrodos de Grafito y A. Galvanizado……..	104
Tabla 38.	Prueba de ANOVA para la potencia en Suelo libre, Césped Torourco, Cacao y Palma Aceitera, con electrodos de Cobre y Aluminio……...	105
Tabla 39.	Prueba de ANOVA para la densidad de potencia en Suelo libre, Césped Torourco, Cacao y Palma Aceitera, con electrodos de Cobre y Aluminio…….	105

Tabla 40.	Prueba de Tukey HSD para la densidad de potencia en Suelo libre, Césped Torourco, Cacao y Palma Aceitera, con electrodos de Cobre y Aluminio……..	105
Tabla 41.	Promedio de Voltaje (V) de 7 días con electrodos de Cobre y Aluminio……..	107
Tabla 42.	Promedio de corriente (mA) de 7 días con electrodos de Cobre y Aluminio……..	107
Tabla 43.	Promedio de potencia de 7 días con electrodos de Cobre y Aluminio……..	108
Tabla 44.	Promedio de densidad de potencia de 7 días con electrodos de Cobre y Aluminio……	108
Tabla 45.	Promedio de energía eléctrica de 7 días con electrodos de Cobre y Aluminio……	109
Tabla 46.	Promedio de voltaje de 7 días con electrodos de Grafito y A. Galvanizado……	111
Tabla 47.	Promedio de corriente de 7 días con electrodos de Grafito y A. Galvanizado……	111
Tabla 48.	Promedio de potencia de 7 días con electrodos de Grafito y A. Galvanizado……	112
Tabla 49.	Promedio de densidad de potencia de 7 días con electrodos de Grafito y A. Galvanizado……..	112
Tabla 50.	Promedio de energía eléctrica de 7 días con electrodos de Grafito y A. Galvanizado……	113

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Celda electroquímica modelo con electrodos de Zn/Zn2+ y Fe2+/Fe3+ (Pt)……....	13
Figura 2.	Celda de Daniell (Cobre - Zinc)…….	14
Figura 3.	Esquema del funcionamiento de una celda de combustible……	16
Figura 4.	Diagrama esquemático de una celda de combustible microbiana……	17
Figura 5.	Conexión en serie de dos conductores……	40
Figura 6.	Conexión en paralelo de dos conductores……..	40
Figura 7.	Mapa de ubicación de la Universidad Nacional de Ucayali "Área de estudio"……..	47
Figura 8.	Población de Palma Aceitera, Cacao y Césped Torourco……..	47
Figura 9.	Alambre Galvanizado como Cátodo…….	51
Figura 10.	Grafito como Ánodo, de pilas AA……..	51
Figura 11.	Alambre de Aluminio como Cátodo……..	51
Figura 12.	Cable de Cobre como Ánodo……	51
Figura 13.	Palma Aceitera como estrato arbóreo…….	52
Figura 14.	Cacao como estrato arbustivo……..	52
Figura 15.	Césped Torourco como estrato herbáceo……..	52
Figura 16.	Suelo libre como testigo…….	52
Figura 17.	Electrodo de Grafito……	53
Figura 18.	Electrodo de Alambre Galvanizado……..	53
Figura 19.	Electrodo de Cobre…….	53
Figura 20.	Electrodo de Aluminio…….	53
Figura 21.	Diseño de la biocelda, con cátodo (-) y ánodo (+)…….	54
Figura 22.	Vista de planta de la biocelda de 5x5 grupos de subbioceldas, circuito en serie……	54
Figura 23.	Biocelda de 5x5 grupos de subbioceldas, circuito en serie……..	55
Figura 24.	Instalando bioceldas en Palma Aceitera…….	55
Figura 25.	Preparando suelo para instalar bioceldas en Cacao…….	55
Figura 26.	Instalando bioceldas en Césped Torourco…….	55
Figura 27.	Preparando suelo libre para la instalación de bioceldas……...	55
Figura 28.	Raíces de Palma A. colonizadas en las bioceldas…….	56
Figura 29.	Instalando electrodos en las bioceldas de Palma A……	56
Figura 30.	Enraizamiento de Césped Torourco en las bioceldas……	56
Figura 31.	Instalación de Electrodos en Césped Torourco……..	56
Figura 32.	Enraizamiento de Cacao en las bioceldas……	57
Figura 33.	Instalación de electrodos en Cacao……..	57
Figura 34.	Bioceldas y electrodos en suelo libre…….	57
Figura 35.	Medición de Voltaje y corriente en Suelo libre…….	58
Figura 36.	Medición de voltaje y corriente en Césped Torourco…….	58
Figura 37.	Medición de voltaje y corriente en Cacao…….	58
Figura 38.	Medición de voltaje y corriente en Palma A…….	58
Figura 39.	Estación meteorológica de la UNU……	59
Figura 40.	Muestreo de Suelo en Césped Torourco…….	60

Figura 41.	Muestreo de suelo en Cacao……..	60
Figura 42.	Muestreo de suelo de Palma A……..	60
Figura 43.	Energía eléctrica obtenido en Suelo libre, Césped Torourco, Cacao y Palma Aceitera con dos electrodos diferentes…….	63
Figura 44.	Voltaje obtenido en Suelo libre, Césped Torourco, Cacao y Palma Aceitera con dos electrodos diferentes……	65
Figura 45.	Corriente obtenido en Suelo libre, Césped Torourco, Cacao y Palma Aceitera con dos electrodos diferentes…….	66
Figura 46.	Potencia obtenida en Suelo libre, Césped Torourco, Cacao y Palma Aceitera con dos electrodos diferentes……	76
Figura 47.	Densidad de corriente obtenido en Suelo libre, Césped Torourco, Cacao y Palma Aceitera con dos electrodos diferentes…….	77
Figura 48.	Costos de producción de energía eléctrica con bioceldas, según demanda……	78
Figura 49.	Instalación de electrodos….....	121
Figura 50.	Bioceldas instaladas……	121
Figura 51.	Recolección de voltaje y corriente en Palma A……	121
Figura 52.	Recolección de voltaje y corriente en Césped Torourco……...	121
Figura 53.	Recolección de voltaje y corriente en Cacao……..	121
Figura 54.	Recolección de voltaje y corriente en Suelo libre……...	121

RESUMEN

La amenaza de las fuentes fósiles y el incremento de la dependencia energética en el mundo ha generado un interés de ahondar en nuevas fuentes de energía, el objeto de estudio fue determinar la cantidad de energía eléctrica de la rizosfera de las planta, desarrollado en el área de la estación meteorológica, jardín botánico de Cacao y Cultivo de Palma de la Universidad Nacional de Ucayali, en la fotosíntesis las plantas obtienen sus alimentos de todo lo generado no lo asimilan a un 100%, lo restante lo expulsan en forma de exudados radiculares, una gama de compuestos químicos en la rizosfera, área que alberga microorganismos que metabolizan estos compuestos liberando electrones en el suelo, que son captados mediante bioceldas.

Se instaló bioceldas comprendidas por botellas y electrodos de Grafito (+) y Alambre Galvanizado (-); Cobre (+) y Aluminio (-), que actuaron como aceptores de electrones en suelo libre (testigo), Césped Torourco (T1), Cacao (T2) y Palma Aceitera (T3), se registró datos de voltaje y amperaje, a partir de ello se calculó la energía eléctrica (kWh) y la capacidad de las bioceldas (W/m2), mediante el método numérico y analítico, en base a las condiciones ambientales, actividad fisicoquímica y microbiológica del suelo, se realizó un análisis de varianza, correlacional de spearman y Pearson con el software SPSS 24.

Se obtuvo mayor energía con electrodos de Grafito (+) y Alambre Galvanizado (-) con 3.968 mWh en Cacao y 0.48 mWh en Suelo libre para electrodos de Cobre (+) y Aluminio (-), los parámetros que influyen en el voltaje es la temperatura, punto de marchitez, aluminio, hidrógeno, capacidad de intercambio catiónico, en la corriente es estrato vegetal, capacidad de campo, pH, fósforo, potasio, calcio, magnesio, saturación de aluminio, bases, ácidos cambiables, bacterias aerobias, actinomicetos y en ambos la conductividad eléctrica, materia orgánica, cadmio, bacterias heterotróficas anaerobias, fungi, temperatura ambiental y humedad ambiental; por otro lado el costo para cubrir la demanda energética es elevado por los inicios en esta nueva fuente de energía.

Palabras Claves: *Energía, plantas, electrodos, densidad de potencia, bioceldas.*

ABSTRACT

The threat of fossil sources and the increase in energy dependence in the world has generated an interest in delving into new energy sources, the object of study was to determine the amount of electrical energy of the rhizosphere of the plants, developed in the area from the meteorological station, botanical garden of Cocoa and Cultivation of Palma of the National University of Ucayali, in photosynthesis the plants obtain their food from everything generated does not assimilate it to 100%, the rest they expel in the form of root exudates, a range of chemical compounds in the rhizosphere, an area that houses microorganisms that metabolize these compounds by releasing electrons in the soil, which are captured by biocells.

Biocells comprising bottles and electrodes of Graphite (+) and Galvanized Wire (-) were installed; Copper (+) and Aluminum (-), which acted as electron acceptors in free soil (control), Torourco Lawn (T1), Cocoa (T2) and Palm Oil (T3), voltage and amperage data, from of this the electrical energy (kWh) and the capacity of the biocells (W / m2) were calculated, using the numerical and analytical method, based on the environmental conditions, physicochemical and microbiological activity of the soil, an analysis of variance was carried out, correlational of spearman and Pearson with the SPSS 24 software.

Increased energy was obtained with Graphite (+) and Galvanized Wire (-) electrodes with 3,968 mWh in Cocoa and 0.48 mWh in free soil for Copper (+) and Aluminum (-) electrodes, determining the parameters that influence the voltage is temperature, wilting point, aluminum, hydrogen, cation exchange capacity, in the current is plant stratum, field capacity, pH, phosphorus, potassium, calcium, magnesium, aluminum saturation, bases, changeable acids, aerobic bacteria, actinomycetes and in both it is electrical conductivity, organic matter, cadmium, anaerobic heterotrophic bacteria, fungi, ambient temperature and environmental humidity; On the other hand, the cost to cover the energy demand is high due to the beginnings of this new energy source.

Keywords: *Energy, plants, electrodes, power density, biocells.*

INTRODUCCIÓN

La amenaza del cambio climático, la dependencia de las importaciones energéticas y el carácter finito de los recursos fósiles han provocado una preocupación generalizada sobre la energía en lo que a la seguridad del suministro se refiere, y a los impactos ambientales asociados a su producción y consumo, por lo que muchos países han aumentado las inversiones en fuentes de energía renovable como parte de la solución a estos problemas, y desde las Naciones Unidas se ha hecho especial hincapié en que los gobiernos actúen en aras de conseguir un crecimiento y desarrollo sostenibles (Caraballo & García, 2017).

En la última década estos sistemas bioelectroquímicos han atraído el interés de diversos investigadores, no sólo por la tendencia mundial en la producción de energía sostenible, sino también por su operación simultánea para degradar materia orgánica y biorremediación. Estas aplicaciones dependen esencialmente del metabolismo microbiano sobre el cual el conocimiento aún es limitado, requiriéndose una mejor comprensión de la compleja ecología microbiana (Revelo, Hurtado, & Ruiz, 2013).

Las Celdas de Combustible Microbianas (CCMs) son una tecnología emergente que podrían contribuir a solucionar dos de los problemas más críticos que afronta la sociedad actual: la crisis energética y la disponibilidad de agua no contaminada. Una CCM es un dispositivo que utiliza microorganismos para convertir la energía química presente en un sustrato en energía eléctrica, esto es posible cuando bajo ciertas condiciones algunos microorganismos transfieren los electrones producidos en su actividad metabólica a un electrodo (ánodo) en lugar de a un aceptor natural de electrones (como oxígeno). Este proceso contribuye a degradar la materia orgánica representada como sustrato o combustible (Pant, Bogeart, Diels, & Vanbroekhoven, 2010). El potencial de estos dispositivos es enorme, en diversos trabajos se ha demostrado su efectividad (Rabaey, Lissens, Siciliano, & Verstraete, 2003; Du, Li, & Gu, 2007; Pant et al., 2010), lo que ha creado grandes expectativas en la comunidad científica ya que es posible producir energía limpia mediante la explotación de la biomasa que existe en las aguas residuales domésticas e industriales.

La investigación se desarrolla para demostrar cuales son las condiciones ambientales, fisicoquímicas y microbiológicas del suelo que influencian en el voltaje y corriente, como también el electrodo que mejor se adaptan y mayor eficiencia tiene

para la captación de electrones, esto con la finalidad de aportar una metodología que permita el aprovechar los electrones libres, el objetivo principal de la investigación es ***"Determinar la cantidad de energía eléctrica a partir de electrones libres , producto de actividad metabólica de los microorganismos en la plantas de Palma Aceitera, Cacao y Césped Torourco",*** con base científica.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Se trata de un campo muy novedoso, en el que un equipo de investigadores españoles del Centro de Astrobiología (CAB) y del Instituto de Electroquímica de la Universidad de Alicante, junto a otro argentino de la Universidad de Mar del Plata, han conseguido dar un paso relevante: registrar con técnicas espectroscópicas la transferencia directa de electrones entre una bacteria viva y un electrodo de oro, en un espacio de cinco nanómetros. “Nunca antes se había conseguido visualizar de forma clara este proceso, pues dentro de una célula existen multitud de moléculas y no resulta sencillo saber cuáles son las importantes”, detalla Juan Feliu, director del grupo de Electroquímica de Alicante (Álvarez, 2008a).

Con este experimento, los investigadores consideran demostrado que bacterias como Geobacter generan electricidad, Abraham Esteve Núñez, bioquímico del CAB, que tuvo la oportunidad de mostrar los resultados del trabajo en el Primer Simposio Internacional sobre Pilas de Combustible Microbianas, celebrado recientemente en Pensilvania (EEUU). Esteve Nuñez trabajaba como postdoctoral en el laboratorio de la Universidad de Massachussetts (EEUU) que, en el 2002, descubrió que se podía obtener electricidad de la bacteria Geobacter a partir de su simple contacto con un ánodo, sin recurrir a mediadores químicos (Álvarez, 2008b).

El mayor desafío ahora es que los ingenieros logren diseñar sistemas más eficientes y los científicos aprendan a sacar el máximo partido a las bacterias electrogénicas (Álvarez, 2008c).

“El Geobacter es capaz de transformar internamente energía química en energía eléctrica, transfiriendo los electrones derivados de la oxidación de compuestos orgánicos (acetato) a electrodos y así constituir una celda de combustible microbiana (Microbial Fuel Cell, MFC)” (Romero, Adrian & Lugo, 2012).

Producto de la fotosíntesis la plantas generan sus propios alimentos, de todo lo generado durante este proceso las plantas no asimilan todo los compuestos, es por ellos que estos liberan una gran cantidad compuestos (exudados) por

las raíces y es el área de influencia rizosfera la que alberga los microorganismos capaces de oxidar los carbohidratos en condiciones anóxicas, produciendo electrones en el suelo y junto a ello hacemos referencia que la energía eléctrica es el fluido de electrones a través conductor.

Los electrones pueden ser conducidos a través de electrodos y celdas galvánicas, induciendo una corriente y voltaje; haciendo funcionar una CCM por un determinado tiempo, probablemente haya generación de energía eléctrica mediante la captación de estos electrones.

1.1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.1.1. General

¿Cuál es la cantidad de energía eléctrica obtenida a partir de los electrones libres, producto de la actividad metabólica de los microorganismos en las plantas de Palma Aceitera *(Elaeis guineensis)*, Cacao *(Theobroma cacao)* y Césped Torourco, *(Axonopus compresus)*, en la UNU?

1.1.2. Específico

- ¿Cuál es el estrato vegetativo, electrodos, horario de medida y las condiciones del suelo que propicia la mejor generación de electrones libres, en las plantas de Palma de Aceitera (Eleais guineensis), Cacao (Theobroma cacao) y Césped Torourco (Axonopus compresus)?
- ¿Cuál es la capacidad de las bioceldas por área (W/m^2), empleados para la captación de electrones libres, producto de la actividad metabólica de los microorganismos en la rizosfera?
- ¿Cuál es el costo de producción de energía eléctrica con bioceldas para un celular, laptop, casa en zona rural y urbana?

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. General

Determinar la cantidad de energía eléctrica obtenida a partir de los electrones libres, producto de la actividad metabólica de los microorganismos en las plantas de Palma Aceitera (Elaeis guineensis),

Cacao (Theobroma cacao) y Césped Torourco, (Axonopus compresus), en la UNU.

1.2.2. Específicos

- Determinar el estrato vegetativo, electrodos, horario de medida y las condiciones del suelo que propicia la mejor generación de electrones libres, en las plantas de Palma de Aceitera (*Eleais guineensis*), Cacao (*Theobroma cacao*) y Césped Torourco (*Axonopus compresus*).
- Cuantificar la capacidad de las bioceldas por área (W/m^2), empleados para la captación de electrones libres, producto de la actividad metabólica de los microorganismos en la rizosfera.
- Establecer el costo de producción de energía eléctrica con bioceldas para un celular, laptop, casa en zona rural y urbana.

1.3. HIPÓTESIS

1.3.1. Hipótesis alternativa (Ha)

Se obtiene energía eléctrica de la actividad metabólica de los microorganismos en las plantas de Palma Aceitera *(Eleais guinensis)*, Cacao *(Theobroma cacao)* y Césped Torourco *(Axonopus compresus).*

1.3.2. Hipótesis Nula (H0)

No se obtiene energía eléctrica de la actividad metabólica de los microorganismos en las plantas de Palma Aceitera *(Eleais guinensis)*, Cacao *(Theobroma cacao)* y Césped Torourco *(Axonopus compresus).*

1.4. COMPONENTES ESTUDIADOS

1.4.1. Variables independientes

Plantas: Palma Aceitera, Cacao y Césped Torourco.

1.4.2. Variables dependientes

Energía eléctrica.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES DEL PROBLEMA

2.1.1. Internacional

Saavedra (2012), cuya investigación fue “Diseño de una Celda de Combustible Microbiológica con Uso de Bacterias Oxidantes de Azufre y Hierro”, el diseño propuesto fue estudiado experimentalmente acotándolo a un sistema de azufre elemental como combustible y bacterias de la especie Acidithiobacillus ferrooxidans como elemento biocatalizador. Una celda a escala de laboratorio fue construida para dicho propósito, operada en forma discontinua (biopila) de doble cámara anóxica-aeróbica de 135 mL y 35 mL. La obtención de las curvas de polarización y potencia de la celda permiten estimar el potencial desempeño de bioelectrogeneración. Así, se halló un valor de máxima potencia de ~9 Wm^{-2} a una densidad de corriente de 12,5 $mA \cdot cm^{-2}$, magnitudes más de 3 veces superiores a los valores máximos encontrados en sistemas de sustrato orgánico. Las curvas obtenidas presentan un acentuado fenómeno de histéresis que cuestionan la escalabilidad de este desempeño. La eficiencia energética, respecto del cambio de energía libre de Gibbs de la oxidación de S^0 con O^2, en la operación continua al punto de máxima potencia se estima <15 % con un rendimiento del combustible < 0,64 kWh/kgS^0, siendo el máximo teórico 4,31 kWh/kgS^0. Dado un valor referencial de 10 $USD/tonS^0$, este tipo de energía resulta de relativo bajo costo alcanzando 15,6 ¢USD/kWh para el desempeño registrado.

Revelo, Hurtado, & Ruiz (2013), Celdas de Combustible Microbianas (CCMs): Un Reto para la Remoción de Materia Orgánica y la Generación de Energía Eléctrica, se presentan y discuten los aspectos más importantes que inciden en el desempeño de una celda de combustible microbiana, tales como su arquitectura, la función microbiana y el tipo de sustratos. En la última década estos sistemas bioelectroquímicos han

atraído el interés de diversos investigadores, no sólo por la tendencia mundial en la producción de energía sostenible, sino también por su operación simultánea para degradar materia orgánica y biorremediación. Estas aplicaciones dependen esencialmente del metabolismo microbiano sobre el cual el conocimiento aún es limitado, requiriéndose una mejor comprensión de la compleja ecología microbiana. En países en desarrollo es importante estudiar otras fuentes de microorganismos y sustratos con variada composición química que puedan ser potenciales combustibles en celdas de diferente configuración. Investigar más sobre estos aspectos será esencial para optimizar y potenciar estos procesos.

Góngora, Ochoa, Sosa, & Vázquez (2017), realizaron una investigación en energía: celdas de combustible microbianas, los objetivos de este proyecto son: demostrar que las plantas producen distintas cantidades de energía, evaluando una celda de combustible microbiana, con el fin de aprovechar esta energía. Una celda de combustible microbiana (CCM) es un dispositivo que tiene como finalidad la obtención de energía eléctrica a través de microorganismos que convierten la energía química encontrada en un sustrato, en energía eléctrica. Las plantas producen energía eléctrica de manera constante y es por ello que medimos esta energía en cuatro plantas diferentes, los resultados promedio obtenidos son: la planta que produce más milivolts es el Árbol de la abundancia (Portulacaria afra) con 134.46 mV, la que menos produce es la Bugambilia (Bougainvillea) con 105.76 mV. Se evaluaron también la Menta (Mentha spicata) 112.68 mV y la Vicaria (Catharanthus roseus) 121.28 mV. Los cambios de humedad no son un factor que, por sí solo, afecten la medida de voltaje en las plantas analizadas.

Buitrón & Pérez (2011), en la investigación producción de electricidad en celdas de combustible microbianas utilizando agua residual: Efecto de la distancia entre electrodos, se evaluó la influencia de la separación de electrodos sobre la producción de electricidad y la eliminación de materia orgánica en celdas de combustible microbianas usando agua residual. Para ello se construyeron tres celdas de geometría semejante, pero con

diferente volumen. En promedio, se obtuvo una eficiencia de eliminación de materia orgánica del 71%. La duración del ciclo fue de 0.97 días para la celda de 40 mL, 1.03 días para la celda de 80 mL y 5.93 días para la celda de 120 mL. El aumento de distancia entre los electrodos (4, 8 y 12 cm) no causó un efecto negativo en la generación de electricidad, pues en la mayor separación (celda de 120 mL) se alcanzó un voltaje máximo de 660 mV, mientras que para las celdas de 40 y 80 mL fue de 540 mV y 532 mV, respectivamente. La densidad de potencia máxima se presentó en la celda con separación de 12 cm (408 mW/m2). Sin embargo, se observó que la potencia volumétrica disminuyó a medida que aumentó la separación entre los electrodos.

Alzate, Fuentes, Álvarez, & Sebastian (2008), en la investigación generación de electricidad a partir de una celda de combustible microbiana tipo PEM, se empleó una celda de combustible microbiana (CCM) a escala de laboratorio para la generación de electricidad. La celda consistió de dos cámaras separadas por una membrana de intercambio protónico (PEM). Se utilizaron electrodos de papel carbón y un catolito acuoso burbujeado con aire para proveer O2 disuelto al electrodo. La generación de potencia en la CCM, se debió a la presencia de bacterias como biocatalizadores en la cámara del ánodo. Las bacterias fueron obtenidas de un inóculo mixto anaerobio de tipo entérico, empleando agua residual sintética (ARS) como sustrato. Se determinó la influencia de la temperatura y el pH sobre el rendimiento de la CCM, encontrando que la mayor densidad de potencia fue generada a temperatura mesofílica de 35 ±5°C y pH entre 5 y 6. Empleando resistencias de 600 y 1000Ω se obtuvieron densidades de 640 y 336mW·m‑2, respectivamente. La eficiencia coulómbica obtenida fue de 59,8%. Este tipo de sistemas resultan atractivos para la generación de electricidad y a la vez para la degradación de la fracción orgánica.

Romero, Adrian, & Lugo (2012), en la investigación bacterias, fuente de energía para el futuro, en el presente trabajo expone una familia de bacterias denominadas Geobacter que tienen la capacidad de producir energía eléctrica como fuente renovable en una celda de combustible

microbiana. Estas bacterias pueden oxidar totalmente compuestos orgánicos empleando diferentes elementos o sustancias como aceptores de electrones. El trabajo aborda características principales de la bacteria, como los mecanismos utilizados para aprovechar la electricidad que genera y una aproximación sobre el sistema requerido para convertirla en una fuente de energía renovable competitiva. Los resultados muestran un análisis comparativo de fuentes de energía convencionales y no convencionales con respecto a la familia de bacterias Geobacter.

El creciente interés por encontrar nuevas fuentes de energía ha llevado a los científicos a fijarse en unos aliados muy peculiares para generar electricidad: las bacterias. Con el mismo concepto que el de las pilas de hidrógeno que se prueba ya en coches, diversos laboratorios intentan desarrollar desde hace unos pocos años otro tipo de células de combustible, en este caso, microbianas (Álvarez, 2008d).

Tal vez la alimentación de un ordenador portátil y las lámparas a través de las plantas sea un sueño u otra idea de ciencia ficción para muchos. Sin embargo, el proyecto Biophotovoltaics conocido como 'Moss Table" es un concepto muy innovador para este fin. Se ha demostrado que las cuestiones de energía en el futuro están bien garantizadas a través de BPV o tecnología única Biophotovoltaic. En el proyecto, la electricidad se hace a partir de electrones capturados que son atrapados a través de fibras conductoras dentro de una tabla de musgo (Globedia, 2012).

Por otro lado, Moss Power es un blog dedicado al bio-diseño y al musgo. Más concretamente al modo en el que las plantas terrestres briofitas pueden integrarse y aprovecharse para obtener electricidad verde de verdad. Un ejemplo es el Moss FM de Fabienne Felder, una radio que funciona con la electricidad producida por un puñado de musgo, que en este caso funcionan a modo de celdas de combustibles naturales que pueden colocarse en batería o en paralelo como se hace con las baterías convencionales para hacer aparatos eléctricos como un reloj digital, un

instrumento de medición con pantalla LCD o una radio FM, como en este caso (Palou, 2015).

Un proyecto científico europeo reciente creó una prueba de concepto de una pila de combustible capaz de generar electricidad a partir de plantas y bacterias vivas. Dicho trabajo ha servido para que un nuevo equipo de científicos introduzca mejoras en este planteamiento de cara a su comercialización. Una pila de combustible microbiana vegetal es un sistema electroquímico en el que las plantas obtienen luz y dióxido de carbono (CO2) y liberan cantidades pequeñas de sustancias químicas al medio de crecimiento, donde bacterias específicas convierten las sustancias químicas en energía química potencial. Si bien los resultados iniciales resultan prometedores, aún es necesario perfeccionar el sistema para aumentar la producción de electricidad, el proyecto financiado con fondos europeos PLANTPOWER se propuso mejorar la producción neta de electricidad de la pila de combustible microbiana vegetal de 0,0067 vatios por metro cuadrado (W/m2) a 3,2 W/m2. Para lograrlo fue necesario optimizar cada faceta del sistema y mejorar el conocimiento sobre las interacciones de sus distintos componentes (PLANTPOWER, 2011).

La promesa de un dispositivo que solo necesita una planta bien cuidada para obtener suficiente energía que recargue la pila de tu celular. Así es como funciona E-Kaia, un producto desarrollado por tres jóvenes ingenieros de Chile, Carolina Guerrero (ingeniero industrial), Camila Rupcich (ingeniero informático) y Evelyn Aravena (ingeniero electrónico); que puede darles una alternativa curiosamente sustentable a los usuarios de tabletas y teléfonos inteligentes, se trata de “enchufar” el equipo que se quiere recargar a través de un cable USB, y las demostraciones indican que el mecanismo cuenta con biocircuito bajo tierra, que genera 5 voltios y 600 miliamperio; todo esto durante el proceso de fotosíntesis la planta produce materia orgánica que convierte la energía de la luz en energía química, los microrganismos se encargan de generar electrones. El dispositivo captura los electrones que no necesita la planta por eso no resulta afectada, para generar energía que requiere el equipo, esto permite

que en una hora y media pueda dársela carga completa a un celular (MUNDO, 2015).

2.1.2. Nacional

La Universidad de Ingeniería y Tecnológica (UTEC), de la mano del profesor Ramírez, decidió ponerse manos a la obra y liderar un grupo compuesto por cuatro profesores y ocho alumnos para “encontrar una solución”, y dieron con ella: en forma de “plantalámparas”, tal y como bautizaron al sistema, fabricadas a partir de plantas, las plantas expulsan al terreno los nutrientes que le sobran. Entonces, interactúa con microorganismos a través de un proceso electroquímico que genera electrones, “Nosotros capturamos esos electrones a través de electrodos y los trasladamos a una batería, la cual, cargada con esa energía, nos permite producir una lámpara eficiente de bajo consumo” (MUNDO, 2015c).

2.2. BASES TEÓRICAS

2.2.1. Energía

La energía se define de forma general como toda causa capaz de producir un trabajo, y su manifestación es precisamente la realización de su virtualidad, es decir la producción de un trabajo, o bien su transformación en otra forma de energía. Etimológicamente, energía proviene de la palabra griega enérgeia (De Juana, et al, 2008).

Formas de la energía

Cengel & Boles (2008) afirman que “la energía puede existir en varias formas: térmica, mecánica, cinética, potencial, eléctrica, magnética, química y nuclear, cuya suma conforma la energía total E de un sistema, la cual se denota por unidad de masa mediante y se expresa como” (p. 53):

$$\mathrm{e} = \frac{\mathrm{E}}{\mathrm{m}} \qquad (Ec.1)$$

2.2.2. Fuentes de energía

La energía se produce en diferentes fuentes y es almacenada de distintas formas. Las fuentes se pueden clasificar en primarias o secundarias, según pueda obtenerse de ellas la energía directamente o sea necesario recurrir a

otra fuente. Así, por ejemplo, la energía eléctrica es una fuente secundaria de energía, porque para su producción es necesario recurrir a otra fuente de energía. También las fuentes de energía se clasifican en renovables y no renovables, según que su consumo sea repuesto, o que ya no se produzca y su consumo acabe por agotar la reserva. A este segundo tipo pertenecen las reservas fósiles: petróleo, carbón y gas natural; en cambio, son renovables la energía solar, la eólica, la hidráulica, la biomasa y la debida a mareas, olas y gradientes térmicos y permanentes (De Juana, et al, 2008).

2.2.3. Electricidad, corriente eléctrica y energía eléctrica

Electricidad

El estudio de la electricidad interviene el conocimiento de la conversión de energía de una forma a otra. La propia energía eléctrica se obtiene por conversión de otras formas de energía a energía eléctrica. Las baterías convierten la energía química en energía eléctrica. Las células solares convierten la energía luminosa en energía eléctrica. Y los generadores convierten energía mecánica (de rotación) en energía eléctrica (Fowler, 1994).

Corriente eléctrica

Como menciona Serway & Faughn (2001), siempre que se desplazan cargas del mismo signo, se dice que existe una corriente. Con objeto de definir la corriente con más precisión, supóngase que las cargas se desplazan en sentido perpendicular a una superficie de área A, como en la ecuación 2. Esta área podría ser el área de sección transversal del alambre, por ejemplo. La corriente es la razón a la que la carga fluye a través de esta superficie. Si ΔQ es la cantidad de carga que pasa a través de esta área en un intervalo de tiempo Δt, la corriente, I, es igual al cociente de la carga entre el intervalo de tiempo:

$$I = \frac{\Delta \mathrm{Q}}{\Delta \mathrm{t}} \qquad (Ec. 2)$$

La unidad SI de corriente es el ampere (A)

Así pues, 1 A de corriente equivale a 1 C de carga que pasa a través del área de sección transversal en un intervalo de tiempo 1 s.

Energía eléctrica

La unidad de medida de la energía eléctrica es Kilowatt-hora (KWh), 1000w x 3600 segundos y esto es 3.6 x 106 J**.**

2.2.4. Electroquímica

La electroquímica ha sido definida clásicamente como la ciencia que trata de los cambios químicos producidos por la corriente eléctrica, y de la producción de electricidad mediante la energía de reacciones química. Teóricamente, las dos ramas son de igual importancia. Sin embargo, industrialmente, los cambios químicos y físicos producidos por el uso de la corriente eléctrica son, con mucho, los más importantes (Mantell, 2003).

Celda electroquímica

Este sistema se forma por dos electrodos separados, por lo menos, por una fase electrolítica. Aquí existe una diferencia de potencial medible entre los dos electrodos, ya sea que en la celda esté o no pasando una corriente. Estos aspectos se pueden entender mejor con una celda modelo, la cual consiste en dos medias celdas separadas por un diafragma (conductor iónico) (véase la figura 1). La mitad izquierda de la celda tiene un electrodo de cinc el cual se sumerge en una solución de cloruro de cinc 0.1M (Vante, 2003a).

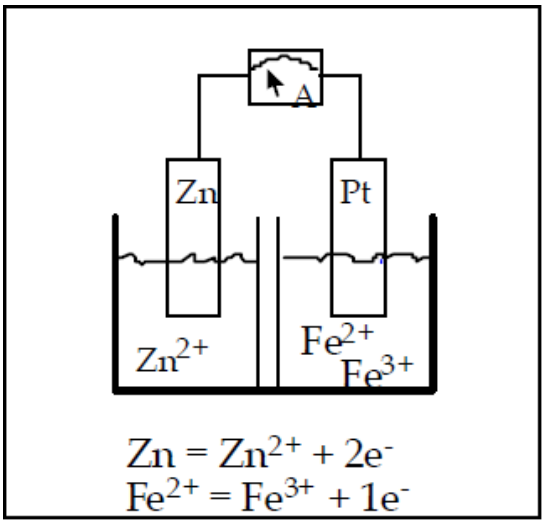


Figura 1. Celda electroquímica modelo con electrodos de Zn/Zn2+ y Fe2+/Fe3+ (Pt) (Fuente: Nicolás Alonso Vante, 2003).

La media celda derecha tiene un electrodo de platino en una solución acuosa de cloruro férrico-ferroso de igual concentración. La polaridad es tal que el

electrodo de cinc es negativo y el platino positivo. La diferencia de potencial, ΔE (circuito abierto) es de 1.56 V ($\Delta E = E_c - E_a = (0.77) - (-0.79)$) cuando no fluye corriente en la celda (Vante, 2003b).

2.2.5. Celdas galvánicas

Son aquellos dispositivos en los cuales se ponen en contacto dos electrodos o semiceldas diferente, mediante un puente salino y un alambre conductor de electricidad, de modo que se genera una corriente eléctrica continua y ocurre una reacción química redox espontánea (Yupanqui, Alcántara , Meléndez , & Chinchay, 2008).

Al ser conectados los dos electrodos mediante el conductor externo, en el electrodo de mayor potencial de oxidación, denominándose ánodo de la celda; mientras que en el otro electrodo, los electrones son ganados por otra especie, produciendo la reducción, constituyendo el cátodo de la celda (Yupanqui et al., 2008).

Las celdas galvánicas pueden clasificarse según el tipo de electrodo en:

Celdas galvánicas con electrodos activos

Cuando los electrodos participan en la reacción de la celda. Generalmente es el ánodo el que participa en las reacciones químicas.

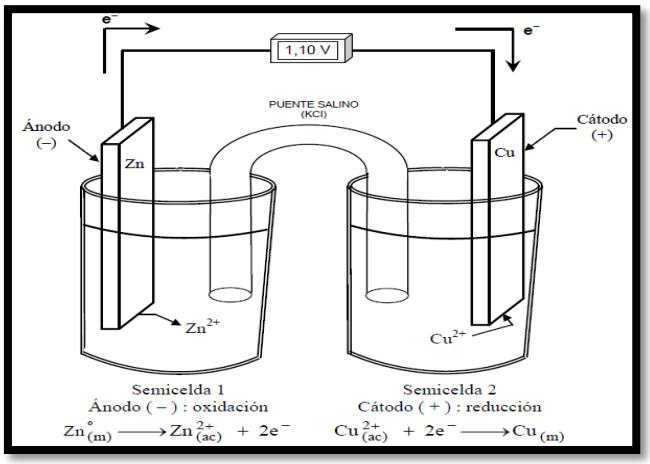


Figura 2. Celda de Daniell (Cobre - Zinc) (Fuente: Yupanqui et al., 2008).

En los electrodos ocurren las siguientes semirreacciones:

Reducción (cátodo): $Cu^{2+} + 2e^- \longrightarrow Cu^o$

Oxidación (ánodo): $Zn^o \longrightarrow Zn^{2+} + 2e^-$

Reacción de Celda: $Zn^o + Cu^{2+} \longrightarrow Zn^{2+} + Cu^o$

Como la semicelda 1 aumenta las cargas positivas y en la semicelda 2 las cargas negativas; entonces se instala el puente salino para compensar dichas cargas con los iones de carga opuesta del puente salino que migran a cada semicelda.

2.2.6. Celdas de combustible microbianas

Aunque las reacciones que tienen lugar en celdas microbial full cell (MFC) fueron descritas a principios del siglo XX, no recibieron mucha atención y su aplicación general es más reciente, la década de 1970. En una celda MFC, la reacción catalítica de microorganismos ayuda a la transferencia de electrones liberados de la oxidación de compuestos orgánicos hacia un electrodo (conversión de energía química en energía eléctrica). Este tipo de celdas han alcanzado un importante grado de avance científico y se ha propuesto que tendrían aplicación como dispositivos biomédicos implantados, entre otros usos (Valera, Solorza, & Hernández, 2010a).

Principios básicos de una celda de combustible por Rosa de Guadalupe González Huerta y Arturo Manzo Robledo

La celda de combustible es una celda galvánica donde se lleva a cabo una reacción espontánea, entre un combustible y un oxidante, que produce una corriente eléctrica, calor y agua como productos de reacción. La estructura básica de una celda de combustible consiste de dos electrodos porosos separados por un electrolito. En la Figura 3 se muestra un esquema de una celda de combustible con las direcciones relativas de los reactivos, productos e iones dentro del sistema. En una celda típica, el combustible se alimenta en el ánodo y el oxidante en el cátodo, ambos en forma continua. Las reacciones electroquímicas se llevan a cabo en los electrodos y simultáneamente, se genera una corriente eléctrica. Las especies iónicas y su dirección de transporte pueden ser diferentes, dependiendo del combustible y oxidantes empleados, esto mismo influye sobre el comportamiento de la celda y sus productos de reacción (Varela et al., 2010b).

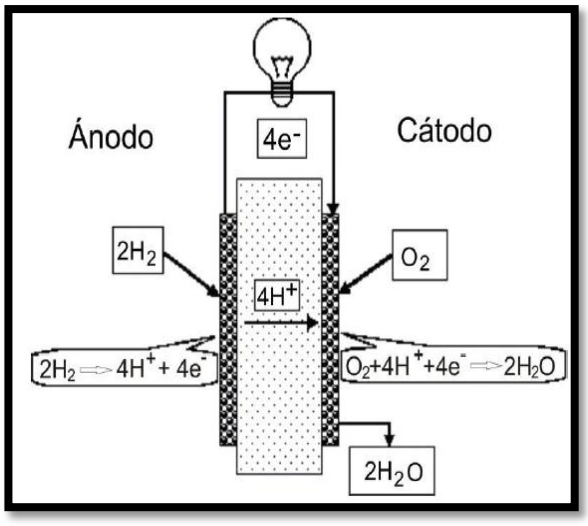


Figura 3. Esquema del funcionamiento de una celda de combustible; (Fuente: Valera et al., 2010).

Principio de una celda de combustible microbiana según H. M. Poggi-Varaldo, A. L. Vázquez-Larios, O. Solorza-Feria

Una celda de combustible microbiana (CCM) representa un nuevo enfoque de tecnología para la generación de bioelectricidad a partir de biomasa usando microorganismos. Una CCM es un reactor bio-electroquímico que convierte la energía química almacenada en los enlaces químicos de la materia orgánica e inorgánica a energía eléctrica mediante reacciones catalíticas de microorganismos bajo condiciones anóxicas (Valera, et al., 2010c).

Una CCM convencional consiste de una cámara anódica y una cámara catódica separadas por una membrana de intercambio protónico (MIP) (Fig. 7.1). Los microorganismos en el ánodo oxidan la materia orgánica (ejemplo, glucosa) generando protones (H+) y electrones (e-) (Valera, et al., 2010d). La ecuación (1) representa una reacción típica con glucosa como sustrato:

$$\text{Ánodo: } C_6H_{12}O_6 + 6H_2O \xrightarrow{\text{Microorganismos}} 6CO_2 + 24H^+ + 24e^-$$

Donde el ánodo actúa como un artificial aceptor de electrones externo para los microorganismos.

A su vez, los electrones son transferidos al cátodo vía ánodo, a través de un circuito externo produciendo una corriente eléctrica, con la reducción del oxígeno puro o del aire para formar agua (Valera, et al., 2010e).

$$\text{Cátodo: } 6O_2 + 24H^+ + 24e^- \longrightarrow 12H_2O$$

Las CCM configuran una tecnología emergente con un gran potencial para contribuir decisivamente al desarrollo sustentable de nuestras sociedades. En principio, tienen un gran impacto en la energía y el medio ambiente, cuando consideramos su capacidad para generar bioelectricidad a partir de sustratos orgánicos y residuales, y simultáneamente depurar residuos. Esto es, las CCM ofrecen simultáneamente dos grandes beneficios: económico y ambiental (Valera, et al., 2010f).

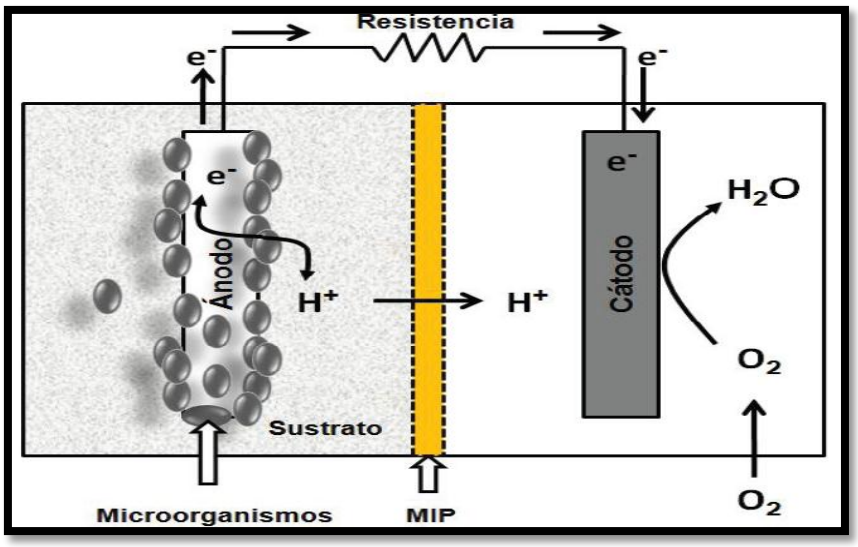


Figura 4. Diagrama esquemático de una celda de combustible microbiana (adaptado de Du et al.,). MIP: membrana de intercambio protónico; (Fuente: Valera et al., 2010).

La generación de electricidad ocurre, cuando los microorganismos consumen un sustrato tal como azúcar en condiciones aerobias que producen dióxido de carbono y agua. Sin embargo, cuando el oxígeno no está presente producen dióxido de carbono, protones y electrones, como se describe a continuación en la siguiente ecuación química (Bennetto, 1990):

$C_{12}H_{22}O_{11} + 13H_2O \longrightarrow 12CO_2 + 48H^+ + 48e^-$

2.2.7. Plantas

2.2.7.1. Fotosíntesis

Etimológicamente fotosíntesis significa síntesis con ayuda de la luz; en realidad, consiste en un conjunto de reacciones que conducen a que las

plantas iluminadas sinteticen su propia materia orgánica. El proceso es fundamental para la vida (Barceló, Nicolás, Sabater, & Sánchez, 2009)

Mediante un único y complejo proceso fisiológico denominado fotosíntesis, determinados organismos vivos autótrofos, también llamados fotoergónicos o fotosintéticos, son capaces de absorber y utilizar la energía luminosa. Cualquier fuente de luz visible (por ejemplo, una lámpara incandescente o fluorescente) sirve a los organismos fotosintéticos para hacer fotosíntesis. Por ello no hay nada específico o misterioso en que el sol los haga crecer. Simplemente usan su luz; si bien, la luz solar tiene una intensidad y un espectro difíciles de alcanzar o imitar con iluminación artificial (Azcón & Talón, 2000).

2.2.7.2. Raíz y exudados radiculares

"El sistema radicular cumple normalmente las funciones de fijación de la planta, absorción de agua y sustancias minerales nutritivas" (Sitte, Weiler, Kadereit, Bresinsky, & Kömer, 2004), "sin embargo la raíz también cumple otro rol, ésta secreta un enorme rango de compuestos" (Badri & Vivanco, 2009).

Las raíces primarias, secundarias y sus cabellos radiculares, genéricamente son capaces de liberar cantidades significativas de exudados. El proceso en si depende en forma general de la especie de planta, presencia de microbios, estatus nutricional y agua de la planta, disponibilidad de oxígeno, medio de desarrollo y otras condiciones de crecimiento. Como se señaló, las raíces exudan una variedad importante de compuestos de, donde se incluyen azúcares y polisacáridos simples (tales como arabinosa, fructuosa, glucosa, maltosa, manosa y oligosacaridos), aminoácidos (tales como arginina, asparganina, cisterna y glutamina), ácidos orgánicos (tales como ácido acético, ascórbico, benzoico, ferúlico y málico) y compuestos fenólicos (Tabla 3), muchos de los cuales poseen actividades y funciones demostradas. Dentro de los compuestos exudados con mayores pesos moleculares encontramos los flavonoides, enzimas, ácidos grasos, reguladores del crecimiento, esteroides, carbohidratos, alcaloides, poliacetilenos, etc. Así, existe una gran diversidad estructural en los exudados de la raíz, que van desde moléculas relativamente sencillas hasta moléculas más complejas estructuralmente, como flavonoides y alcaloides (Oliveros , Macías, Carrera, Marín, & Molinillo, 2009). A todos estos compuestos se denomina exudados radiculares.

Tabla 1. *Compuestos orgánicos detectados en exudados de raíz de plantas.*

Clase	Ejemplos	Función reportada
Carbohidratos	Arabinosa, glucosa, fructuosa, galactosa, maltosa, ramosa, sacarosa y ribosa	Proveer ambiente favorable para el crecimiento de microorganismo
Aminoácidos y aminas	Todos los 20 aminoácidos proteicos, ácido amino butírico, homoserina, cistationina y ácido mugineíco	Inhibidor de nematodos
Ácidos alifáticos	Fórmico, acético, butírico, propiónico, maleíco, cítrico, isocítrico, oxálico, fumárico, malónico, succínico, tartárico, oxaloacético, pirúvico, oxalogutárico, glicólico, chiquímico, acetonico, valerico, glucónico	Reguladores del crecimiento de la planta y efecto inhibidor
Ácidos aromáticos	p-hidroxibenzoíco, cafeíco, p-cumárico, ferúlico, gálico, gentísico, protecatecuico, salicílico, sináptico, siringico	Efecto estimulante, dependiente de la concentración de prueba
Fenólicos varios	Flavonoides, flavonas, flavononas, antocianininas, isoflavonoides	Inhibidor o estimulante del crecimiento dependiendo de la concentración de prueba
Ácidos grasos	Linoleíco, linolénico, oleíco, palmítito, esteárico	Reguladores de crecimiento
Steroides	Compestrol, colesterol, sitosterol, estigmasterol	Reguladores de crecimiento
Enzimas y otros		Desconocidos

Fuente: Oliveros et al., 2009.

“Los exudados radiculares están presentes en una zona de la raíz llamada rizosfera la cual es rica en nutrientes” (Gnanamanickam, 2007) y “juegan un papel muy importante en la rizosfera, afectando a su composición y el crecimiento de aquellos organismos que viven en la rizosfera” (Bais, Weir, Perry, Gilroy, & Vivanco, 2006).

De acuerdo a la literatura Marschner (1995), otro factor importante respecto al crecimiento de microorganismos fúngicos podría ser la disponibilidad de carbono, puesto que el 30 - 60 % del carbono neto fotosintetizado es conducido hacia la raíz, y de ese carbono, una proporción considerable es liberada como carbono orgánico a la zona rizosférica.

Barber & Martin (1976) observaron que los exudados de trigo y cebada alcanzaban entre 7-13% del peso seco total de las plantas, en suelo estéril. En suelo no estéril los exudados radiculares aumentaron a 19-25%.

Otros valores fueron encontrados por Martin (1977) y Sauerbeck & Johnen (1977). Observaron que el C liberado a través de las raíces que crecían en suelo ascendió a un 20% del total de materia seca de Iofijado por fotosíntesis. Martin (1977) concluyó que el 39% del C traslocado a las raíces fue liberado en el suelo.

2.2.7.3. Interacciones en la rizosfera de las plantas

Se conoce que el suelo, y en especial la rizosfera, son los ambientes donde existe la mayor biodiversidad, debido a que es una región altamente favorable para la proliferación y actividad metabólica de numerosos microorganismos (Nannipieri, et al., 2003). Alrededor del 15% del área de las raíces se considera cubierta por microorganismos específicos (Sylvia, Fuhrmann, Hartel, & Zuberer, 2005). La composición y los roles de las comunidades microbianas rizosféricas no están totalmente comprendidos aún. En un sentido amplio, los micorganismos benéficos de la rizosfera incluyen simbiontes (ciertos Actinomycetes y hongos micorrícicos) y saprófitos de vida libre (Schippers, Bakker, & Bakker, 1987).

2.2.7.4. Palma Aceitera (*Elaeis guineensis*)

Las raíces primarias se extienden radialmente desde la base de la palma en dirección horizontal y vertical; las raíces primarias descendentes que proceden directamente desde la base de la palma son menores en número que las

radiales y tienen menos raíces secundarias , Ruer (1969) citado por (Cristancho, Munévar, Acosta, Santacruz, & Torres, 2007) demostró que estas raíces son para sostenimiento y desempeñan poco o ningún papel en la absorción del agua; las restantes raíces primarias que aparecen desde la base del tallo en todos los ángulos con respecto a la superficie del suelo, tienden a inclinarse horizontalmente y pocas se encuentran a más de un metro de profundidad en el perfil del suelo.

De estas raíces primarias, cuyo diámetro oscila entre 4 y 10 mm, suben y bajan raíces secundarias aproximadamente en números iguales, aunque con ligera predominancia de las raíces ascendentes. Estas raíces secundarias tienen de 1 a 4 mm de diámetro y dan origen, a su vez, a raíces terciarias de 0,4 a 1 mm que crecen horizontalmente, hasta 15 cm de largo. De éstas se desarrolla la masa de raíces cuaternarias de hasta 3 cm de largo y solo de 0,2 a 0,4 mm de diámetro. La densidad de todas las clases de raíces en los primeros 40 cm del suelo generalmente disminuye con la distancia a partir de la palma; pero en palmas adultas, la cantidad de raíces absorbentes en círculos sucesivos cada vez es mayor alrededor de la palma y aumenta hasta un radio de 3,50 a 4,50 m. La mayor cantidad de raíces está en los primeros 15 ó 30 cm del perfil de suelo. Las raíces de todas las clases muestran un tropismo positivo hacia las mejores condiciones de abastecimiento de agua y de nutrientes, y hacia donde haya material vegetal en descomposición (Hartley, 1983).

2.2.7.5. Cacao (*Thebroma cacao*)

La raíz es el órgano vegetativo de la planta adaptado para la absorción y conducción de agua con sales minerales. Además, fija la planta al substrato y almacenas sustancias de reserva elaboradas en los órganos verdes (Castro, 2015). En la figura 1, se presenta la distribución de las raíces del cacao.

La raíz pivotante o primaria de las plantas provenientes de semilla tiende a crecer hacia abajo y en forma erecta. Su longitud y forma varía mucho de acuerdo principalmente con la estructura, textura y consistencia del suelo. El cacao posee una raíz principal con más de un metro de profundidad que sirve para sostener a la planta; también tiene muchas raíces secundarias que se encuentran distribuidas alrededor del árbol, que por lo general están entre 0 – 5 cm del suelo; que se encargan de absorber los nutrientes del suelo. La mayor

parte de la raíz secundaria se encuentran inmediatamente debajo de este cuello, en la porción superior de 15 a 20 cm de la capa húmica del suelo. Las raíces secundarias a menudo se extienden hasta distancias de 5 y 6 m del tronco; crecen horizontalmente con respecto al tronco, tienen raíces laterales y se dividen rápidamente. Con frecuencia cambian de dirección repentinamente formando ángulos pronunciados, o se desvían de acuerdo con la presencia de estorbos o irregularidades del suelo. Sus puntos terminales tiendes a crecer hacia arriba dentro de la capa húmica. Por otra parte, las raíces secundarias inferiores de la raíz pivotante tienden a crecer hacia abajo en dirección a la roca madre o hacia la capa freática. Generalmente la parte central de la raíz pivotante esta desprovista de raíces secundarias. En plantaciones viejas de cacao a menudo se observa en la superficie del suelo una densa capa de raicillas entremezcladas, llenas de ramificaciones, que se originan en los extremos de las raíces secundarias. Tales raicillas están inmediatamente debajo de la carpa de hojarasca en descomposición, con la cual están en estrecho contacto físico, asociación que posiblemente incluye micorrizas. La cantidad y densidad de esta capa de raíces depende mayormente de la precipitación y de la permeabilidad del suelo. Siendo más gruesa en donde la precipitación es alta y continua y la permeabilidad del suelo baja, ya que bajo tales condiciones la mayor aireación del suelo tiene lugar en la capa superficial que consiste de materia orgánica y de grumos. Posiblemente las raicillas absorbentes producen auxinas (hormonas de crecimiento) cuando disponen de buena aireación (Hardy, 1961).

2.2.7.6. Césped Torourco (*Axonopus compressus*)

Modelos de sistemas radiculares de pastos oligótrofos

Según Hernández, Pastor, Urcelay & Estalrich, (1992):

- Sistema radicular de tipo fasciculado. Raíces muy finas (< 0.5 mm) y numerosas (hasta más de 20 las principales en algunos casos). Las secundarias mucho más finas y cortas. Parecen auténticas "cabelleras rubias". Pueden pasar los 10 cm de profundidad, si bien sus ramas se extienden principalmente en el nivel de 0-5 cm (Gramíneas anuales esencialmente, como Bromus hordaceus).

- Sistema radicular con rizomas o estolones; raíces primarias gruesas (entre 0.5 y 1 mm) y largas, de color claro, algunas marrones en la base. Tienen ramificaciones muy pequeñas y finas. También pueden sobrepasar los 10 cm de profundidad. El calibre del rizoma generalmente está entre 1.5 y 2.5 mm (Gramíneas perennes principalmente, como Cynodon dactybn).
- Sistema fascicular de raíces finas (aprox. 0.25 mm) y oscuras. No sobrepasan los 10 cm de la capa superficial edáfica; normalmente se sitúan en los cinco primeros cm (Gramíneas anuales como las especies del género Vulpia).
- Sistema radicular con rizoma muy grueso, generalmente oscuro, puede tener hasta 6 mm de calibre. De él salen raíces que sobrepasan holgadamente los 10 cm de profundidad y tienen casi 1 mm); todas ellas están ramificadas, pero con ramificaciones muy cortas. (Especies perennes, pero no gramíneas, como Cyperus longus).
- Sistema radicular axomorfo, con raíz principal bastante larga y < 0.5 mm). Son sistemas generalmente de colores claros, con nodulos sobre la raíz principal, primarios y secundarios. (Leguminosas como los tréboles).
- Sistema radicular axomorfo, generalmente más corto que el anterior y con mayor diámetro su raíz principal (aprox. 1 mm). Los nodulos suelen ser gruesos y se sitúan esencialmente sobre la raíz principal. A veces, parece como si tuviera estolones configurando un comportamiento de plantas perenneantes. (Leguminosas preferentemente, como Ornithopus compresus).
- Sistema radicular axomorfo, con una raíz principal gruesa, de diámetro aproximado entre 1 y 1.5 mm y no suele sobrepasar los 0-10 cm. Tiene pocas ramificaciones y cortas. Son de color oscuro y fuertes. (Plantas no leguminosas ni gramíneas generalmente; por ejemplo, especies de Tuberaria).

2.2.7.7. Relaciones suelo-planta en la nutrición

En general, solo se hallan disponibles para la planta aquellos elementos que se encuentran en forma soluble o en los lugares de intercambio iónico de las micelas del suelo. Este intercambio es preferentemente catiónico, dado el

predominio de cargas negativas superficiales en las micelas inorgánicas (arcillas) y orgánicas (humus) del suelo (Barceló et al., 2009a).

La adquisición de nutrientes por la planta está estrechamente ligada a las características de la interfase suelo-raíz de la rizosfera. Estas interases residen fundamentalmente en las paredes de las células más externas de la raíz, la epidermis y los pelos radiculares. Las paredes celulares y los espacios intercelulares forman un espacio de difusión libre que presentan propiedades de potencial de Donnan. Además, muchas plantas han elaborado mecanismos de secreción activa de exudados que facilitan procesos específicos de quelación y solubilización de nutrientes, aumentando así su disponibilidad para la planta. La del pH exterior, el potencial redox y la actividad microbiana son otros componentes esenciales. Como ya se ha identificado, la mayoría de las plantas (95 por 100) presentan micorrizas que facilitan la captación del fosforo y de determinados micronientes. En conjunto, la movilidad de los nutrientes del suelo hacia la raíz puede ocurrir distintos mecanismos: difusión, intercambio iónico, transporte en masa producido por la transpiración e intercepción (Barceló et al., 2009b).

2.2.8. Suelo

2.2.8.1. Propiedades físicas

Textura

La textura es una propiedad física del suelo derivada del tamaño de sus partículas, es decir, las proporciones relativas expresada en porcentaje, de las fracciones minerales que constituyen el suelo. Estas fracciones se encuentran agrupadas de acuerdo a su tamaño: arena, limo y arcilla (Díaz, 2000a).

Según Silva (2010) se obtuvo que el 84.95% de suelos por área de cultivo de la Universidad Nacional de Ucayali con clase textural Franco arenoso que corresponde a las áreas de pasto con *Brachiaria decumbens,* palma aceitera (*Elaeis guineensis,* Jacq), frutales nativos, cacao (*Theobroma cacao*).

Tabla 2. *Cantidad de arena, limo y arcilla, y clase textural del suelo de la Universidad Nacional de Ucayali.*

SUELOS POR ÁREA DE CULTIVO	CANTIDAD ARENA	CANTIDAD LIMO	CANTIDAD ARCILLA	CLASE TEXTURAL
Pasto Brachiaria	58.84 g/l	27.40 g/l	13.60 g/l	Franco arenoso
Palma Aceitera	55.96 g/l	21.30 g/l	22.74 g/l	Franco arcilloso arenoso
Cacao	66.12 g/l	17.84 g/l	16.04 g/l	Franco arenoso

Fuente: Silva, 2010.

Densidad aparente, real y porosidad

De acuerdo a Silva (2010), los suelos del área de la Universidad Nacional de Ucayali, están clasificados como suelos medios que comprende dentro del porcentaje de porosidad de 50.2 a 55.8%.

(Rucks, García, Kaplán, Ponce de León, & Hill, 2004), sostiene que la porosidad es el volumen ó propiedad de contener espacios o vacíos y intersticios en el suelo, que se encuentran ocupados por el aire o agua en proporciones variables. Es una razón que no tiene dimensiones y se expresa generalmente en porcentaje.

Tabla 3*. Densidad aparente, real y porcentaje de porosidad de los suelos de la Universidad Nacional de Ucayali.*

SUELOS CON ESPECIES	DENSIDAD APARENTE	DENSIDAD REAL	% DE POROSIDAD
Pasto Brachiaria	1.28 g/cc	2.5 g/cc	50.20%
Palma Aceitera	1.35 g/cc	2.5 g/cc	53%
Cacao	1.38 g/cc	2.5 g/cc	54.20%

Fuente: Silva, 2010.

2.2.8.2. Propiedades químicas

Reacción del suelo

Los suelos de la zona de Pucallpa tienen reacción extremadamente ácida a fuertemente ácido en los perfiles Cashibococha, Yarinacocha, Aguajal, Campo Verde y Colina (Díaz, 2000b).

Tabla 4. *pH a diferentes profundidades según horizonte del suelo de Yarinacocha.*

Horizonte	Profundidad (cm)	pH
Ap	0 -12	4.7
AB	12 – 22	4.6
Bw1	22 – 24	4.3
Bw2	44 – 72	4.4
Cg	72 – 120	4.2

Fuente: Díaz, 2000.

En estos rangos de pH, la acidez se debe principalmente a los iones hidrógeno y aluminio; en este caso el aluminio es liberado por hidrólisis de os minerales o se pone en solución de los sitios de intercambio. Luego, cada Al^{3+} se combina con tres iones OH^{-1} y se precipita, dejando tres iones libres de H^{1+} que reducen el valor del pH (Díaz, 2000c).

Capacidad de intercambio catiónico

La capacidad de intercambio catiónico (CIC), es una propiedad química del suelo estrechamente vinculada a su fertilidad, depende de los coloides inorgánicos (arcillas cristalinas, geles amorfos, óxidos y sesquióxidos de hierro y aluminio) y del contenido de la materia orgánica del suelo (MOS). La mayoría de los suelos tienen una carga permanente y otra carga que varía con el pH (Krull, Skjemstad, & Baldock, 2004a), observándose un aumento de la CIC con el pH, por lo que la CIC total se mide a pH 8,2 (Tan & Dowling, 1984).

Díaz (2000d) afirma que la CIC en el perfil Yarinacocha de 9.6 cmol(+)/kg de suelo a 28 cmol(+)/kg de suelo.

Tabla 5. *Conductividad eléctrica, capacidad de intercambio catiónico a diferentes profundidades, según horizonte del suelo de Yarinacocha.*

Horizonte	Profundidad (cm)	C.E dS/m	CIC (SC) cmol(+)/kg	CIC NH4AcO cmol(+)/kg
Ap	0 -12	0.6	5.31	9.6
AB	12 – 22	0.1	7.94	13
Bw1	22 – 24	0.1	17.9	22
Bw2	44 – 72	0.1	11.38	18
Cg	72 – 120	0.1	16.92	28

Fuente: Díaz, 2000.

Cationes intercambiables

En el perfil Yarinacocha se ha registrado el mayor contenido de aluminio intercambiable, variando de 1.92 cmol(+)/kg de suelo en el horizonte Ap a 13.81 cmol(+)/kg en el horizonte Cg, con un acidez intercambiable que va de 36.90 a 83.4% de los cuales corresponde al aluminio una saturación que varía de 36.18 a 81.62%, en los dos primeros horizontes es de 36.18 y 44.57% respectivamente; pero a partir del horizonte Bw1 (22 cm de profundidad) la saturación de Al aumenta según la profundidad desde 64.3 a 81.62%. En este perfil se ha encontrado una diferencia altamente significativa negativa entre el pH y el porcentaje de saturación de Al, demostrando que a mayor saturación de Al, menor pH (Díaz, 2000e).

Tabla 6. *Cationes intercambiables, % de saturación de Aluminio a diferentes profundidades, según horizonte del suelo de Yarinacocha.*

Horizonte	Profundidad (cm)	CATIONES CAMBIABLES cmol(+)/kg de suelo						Sat Al%
		Ca	Mg	K	Na	H	Al	
Ap	0 -12	0.8	1.33	0.4	0.08	0.78	1.92	36.2
AB	12 - 22	1.2	1.81	0.44	0.16	0.79	3.54	44.6
Bw1	22 - 24	0.64	0.59	0.44	0.12	4.6	11.51	64.3
Bw2	44 - 72	0.16	0.32	0.36	0.03	1.77	8.74	76.8
Cg	72 – 120	0.4	0.32	0.51	0.12	1.76	13.81	81.6

Fuente: Díaz, 2000.

Carbono orgánico, nitrógeno total y relación C/N

En los perfiles Cashibococha, Yarinacocha y Campo Verde; el carbón orgánico disminuye regularmente con la profundidad, lo que estaría indicando que se han desarrollado *in situ*.

En lo referente al nitrógeno total la variación está entre 0.02% en los horizontes Cg, Bt3 y C de los perfiles Yarinacocha, Campo Verde y Colina respectivamente (Díaz, 2000f).

En los perfiles de Cashibococha, Yarinacocha y Aguajal se aprecia claramente que los valores de la relación de C/N aumentan con la profundidad, variando entre 6.56 en el horizonte A y 13.67 en el horizonte 2C de Cashibococha; entre 7.6 en el horizonte Ap y 20.50 en el horizonte Cg de Yarinacocha y entre 5.78 en horizonte A y 11.6 en el horizonte Bwg del perfil Aguajal (Díaz, 2000g).

Tabla 7. *Carbono orgánico, nitrógeno total y relación C/N, a diferentes profundidades, según horizonte del suelo de Yarinacocha.*

Horizonte	Profundidad (cm)	Carbono Orgánico %	Nitrógeno total %	Relación C/N
Ap	0 -12	0.76	0.1	7.6
AB	12 – 22	0.7	0.07	10
Bw1	22 – 24	0.58	0.05	11
Bw2	44 – 72	0.41	0.03	13.67
Cg	72 – 120	0.41	0.02	20.5

Fuente: Díaz, 2000.

Carbono orgánico y propiedades biológicas del suelo

El carbono orgánico es esencial para la actividad biológica del suelo (Aguilera, 2000). Proporciona recursos energéticos a los organismos del suelo (OS), mayoritariamente heterótrofos, en forma de carbono lábil (hidratos de carbono o compuestos orgánicos de bajo peso molecular) (Borie, Aguilera, & Peirano., 1999) Por otro lado, los OS descomponen los residuos orgánicos participando activamente en los ciclos de muchos elementos utilizados por las plantas.

Además, los OS participan en la formación y estabilización de la estructura y porosidad del suelo (Singer & Munns, 1996, Krull, et al., 2004c).

La descomposición de los residuos orgánicos ocurre en tres fases: 1) fragmentación y mezcla con el suelo mineral efectuada por la macro y mega fauna (2-20 mm), 2) ruptura de grandes moléculas mediante la acción de enzimas liberadas por algunos hongos y bacterias y, 3) asimilación y transformación de los productos solubles generados en la etapa anterior a través de los microorganismos del suelo (microflora y microfauna < 100μm) (Singer & Munns, 1996, Paul, Harris, Klug, & Ruess, 1999). Los productos secundarios del metabolismo de los organismos y de la ruptura de grandes moléculas se acumulan como una sustancia coloidal compleja (humus). Los productos finales de la descomposición de los residuos orgánicos y el humus son energía, agua y elementos en formas minerales. Si el oxígeno no es un factor limitante en el suelo, la descomposición se produce por respiración, en caso contrario se produce fermentación (Singer & Munns, 1996). Dependiendo del estado oxidativo del suelo el C mineralizado adopta formas oxidadas (CO_2) o reducidas (CH_4).

La biota del suelo representa de 1 a 3% del COS y el componente microbiano varía desde 100 hasta 1000 μg C g-1 de suelo (Paul, et al., 1999). La actividad biológica actúa en la solubilización, movilización y disponibilidad de nutrientes para las plantas (Borie, et al., 1999).

2.2.8.3. Microorganismos del suelo

Un suelo naturalmente fértil es aquél en el que los organismos edáficos van liberando nutrientes inorgánicos, a partir de las reservas orgánicas, con velocidad suficiente para mantener un crecimiento rápido de las plantas. La actividad biológica de los suelos es la resultante de las funciones fisiológicas de los organismos y proporciona a las plantas superiores un medio ambiente adecuado para su desarrollo. Pero la exigencia de los microorganismos edáficos en energía, elementos nutritivos, agua, temperatura adecuada y ausencia de condiciones nocivas es similar a la de las plantas cultivadas (Wild, 1992a).

Los hongos, según Wild (1992b), pueden representar el 70% de la población microbiana y constituyen el segundo de los dos grandes grupos de

microorganismos del suelo. Todos son eucariotas heterótrofos y se incluyen entre las especies que necesitan nitrógeno, ya sea en forma de sales minerales o de compuestos orgánicos nitrogenados, pues están desprovistos de capacidad fijadora. Las especies edáficas presentan gran diversidad en cuanto a exigencias en sustratos carbonados, variando desde los que pueden utilizar hidratos de carbono, alcoholes y ácidos orgánicos sencillos hasta los que son capaces de descomponer compuestos polimerizados, como la celulosa y la lignina. Este es el caso de los que son parásitos obligados de los vegetales superiores o de los que han desarrollado una simbiosis obligada con determinadas plantas, como micorrizas. Los saprófitos comunes en el suelo pueden ser eficaces transformadores de sustratos edáficos en tejidos microbianos. Algunos de ellos pueden asimilar entre el 30 y 50% del carbono presente en la materia orgánica que descomponen, lo que representa una tasa de conversión muy superior a la de las bacterias, que es del 5 al 20%. Esto significa que el crecimiento muy rápido de los hongos puede originar una elevada demanda del nitrógeno disponible en el suelo, aunque ésta puede quedar mitigada por su relación C/N, que es superior a la que presentar las bacterias (Wild, 1992c).

Estimulación de los microorganismos por la rizosfera

El suministro de compuestos orgánicos a la rizosfera es de entre 50 y 100 mg. de materia orgánica seca por gramo de raíz. En contrapartida, los microorganismos desarrollan en la rizosfera actividades metabólicas de las que se benefician las plantas. El conjunto de interacciones que se establecen recibe el nombre de efecto rizosférico (Barea, 1998).

Colonización de las raíces por los microorganismos

La capacidad de los microorganismos del suelo para sintetizar varios metabolitos es considerada como uno de los más importantes factores de fertilidad de suelos, estos metabolitos influyen en la formación de asociaciones entre los microorganismos de la rizosfera. La rizosfera contiene acerca de 10^6 hongos, 10^7 actinomycetes 10^9 bacterias y 10^3 protozoos por gramo de suelo (Last & Price, 1969).

Efecto de los microorganismos sobre la exudación

El estudio del efecto de los exudados radiculares sobre las poblaciones microbianas es dificultoso debido a la inmediata utilización y transformación de los compuestos por los microorganismos (Hodge et al., 1998).

La mayor concentración de microorganismos se encuentra en la zona cercana a las raíces en lo que se conoce como en nombre de rizosfera. Las raíces corresponden a una biomasa de 5 a 6 Tm por hectárea en un campo cultivado. Su actividad bioquímica produce unos exudados radiculares, que contienen, según las especies vegetales, entre el 10 y el 50 % de la energía fijada por fotosíntesis. Estos exudados ricos en compuestos carbonatados sirven de alimento a los microbios de la rizosfera que, a cambio, proporcionan minerales que necesita la planta (AVS, S.F.).

El C soluble provee un sustrato inmediato para un amplio rango de microorganismos del suelo y es producido por raíces de las plantas como exudados radiculares, por otros organismos vivientes en el suelo que producen exudados y por la descomposición enzimática del C insoluble y del C fijado en la biomasa microbiana. Debido a su rápida asimilación como sustrato, las concentraciones de C soluble en el suelo son muy bajas, representando menos del 1% de C orgánico del suelo.

La actividad de los descomponedores (saprobios) es la responsable del reciclaje del C en el suelo. Toda la materia orgánica pasa a través de estos antes de ser redistribuidos (Paul & Voroney, 1980).

La humedad y la atmósfera del suelo están estrechamente relacionado. El intercambio gaseoso, está ligado con el tipo de suelo y la humedad, que afectan el desarrollo de las raíces y la actividad microbiana (Kemble & Macpherson, 1954).

Clasificación de microorganismos en la rizosfera

Una amplia variedad de organismos vive en la vecindad de las raíces. Estos incluyen miembros de la mayoría de grupos taxonómicos de organismos heterotróficos aeróbicos y anaeróbicos desde bacterias a hongos y de protozoos a animales (Browen, 1980).

Se pueden distinguir cinco categorías:

- Organismos saprótrofos o saprobios: son capaces de usar un amplio rango de moléculas orgánicas complejas (lignina, proteinas, gliproteínas.

celulosa y otros polisacáridos), no difieren mucho de los que viven lejos de las raíces. Son capaces de habitar sobre materia orgánica viva o muerta. Son más numerosos en la rizo/micorrizosfera.

- Organismos especializados de la micorrizosfera: estos organismos dependen completamente de las moléculas orgánicas simples (azúcares, aminoácidos, ácidos orgánicos) liberados por las plantas y sus simbiontes fúngicos. Compiten entre ellos, con los simbiontes y los patógenos en la superficie de la raíz, en Ia colonización y en los estadios de pre-infección. Está representado por las llamadas rizobacterias como *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Azospirillum sp*.
- Patógenos de raíces: son biotróficos y penetran en el tejido radicular. Su interrelación con el ambiente y con otros microorganismos habitantes de la rizosfera es compleja, debido a que su ciclo de vida en parte ocurre fuera y en parte dentro de la raíz. Causan daño en el tejido radicular, alteran la función de absorción y perjudican a la planta. Durante su fase fuera de la raíz compiten por los exudados radiculares con otros organismos de la rizosfera y micorrizosfera. Incluye algunas bacterias y hongos como: *Phytium*, *Fusarium* y *Rhizoctonía sp*.
- Simbiontes de raíz: son biotróficos y dependientes de Ia raíz. Completan como el grupo anterior el ciclo de vida fuera y dentro de la raíz. Son benéficos para las plantas ya que fijan nitrógeno atmosférico (*Rhizobium* y *Frankia*), formando nódulos con las raíces de algunas familias de plantas o proveen agua, minerales y otras sustancias de crecimiento como hacen los hongos micorrícicos.
- Estos grupos, 3 y 4, al igual que el 2 dependen de moléculas pequeñas provistas por la planta.
- Predadores: Los miembros de este grupo son protozoos, nematodos, hormigas, colémbolos y otros insectos, se alimentan de los organismos citados previamente y reducen sus poblaciones.
- El donador de electrones más común en un suelo es el carbono orgánico (independiente de su origen: residuos de plantas, restos de animales o materia orgánica del suelo) (Sagardoy & Mandolesi, 2004a).

No todos los microorganismos necesitan materiales orgánicos como fuentes de energía. Algunos son capaces de usar el dióxido de carbono como una

fuente de carbono y, al mismo tiempo, usar la oxidación de sustancias inorgánicas o reacciones fotosintéticas como fuentes de electrones (Sagardoy & Mandolesi, 2004b).

Condiciones del suelo para el desarrollo de los microorganismos

Los microorganismos presentan ciertos requerimientos básicos para su supervivencia (Sagardoy & Mandolesi, 2004c):

- Un ambiente favorable, con un pH adecuado, una temperatura apropiada y condiciones redox: los microbios del suelo toleran distintos valores de pH. Los que toleran mayor acidez son las bacterias que oxidan al S (especies del género *Thiobacillus*) y que pueden llegar a desarrollar a pH = 1, mientras que los más tolerantes a la alcalinidad son los estreptomicetes que toleran pH = 10.
- En la mayoría de los suelos existe una microflora mesofílica, que duplica su actividad microbiológica cada 10°C de aumento en la temperatura entre 0°C y 30/35°C. Sólo unos pocos grados por encima de la temperatura óptima de actividad produce una caída drástica de actividad biológica; eso es como producto de la desnaturalización que sufren las proteínas y membranas celulares por efecto del exceso de calor.
- Agua.
- Nutrientes minerales.
- Fuente de energía, tratándose siempre de carbono orgánico.
- Fuente de carbono, casi siempre orgánico.
- Donadores y aceptores de electrones.
- Factores de crecimiento.

2.2.9. Electrodos

El cátodo y el ánodo son electrodos donde se realizan diferentes reacciones: el oxígeno se reduce a iones óxido consumiendo dos electrones en el cátodo y el combustible se reduce formando dos electrones en el ánodo. El interconector es la parte que se une al cátodo y protege al electrolito de la atmosfera reductora. Los sellos se utilizan en algunos diseños planares y su función es unir los componentes de la celda. El ´ánodo y el cátodo son porosos y facilitan el transporte de los reactivos y productos a través de los componentes. Cabe mencionar que también son necesarios colectores de corriente, así como

hardware diverso para cubrir todos los requerimientos de la celda (Ivers-Tiffee, Weber, & Herbstritt, 2001).

La diferencia de potencial entre los dos electrodos de una celda galvánica proporciona la fuerza motriz que empuja los electrones a través del circuito externo. A esta diferencia de potencial llamamos fuerza electromotriz (fem o FEM) (Irene, 2007a).

La fuerza electromotriz de una celda se escribe como Ecelda o ΔE y se conoce como potencial de celda o voltaje de celda (porque se mide en voltios) (Irene, 2007b).

2.2.9.1. Cátodo

Alambre galvanizado

Producto que se obtiene por trefilación del alambrón de bajo contenido de carbono, que luego es zincado por un proceso de inmersión en caliente, sus usos, en el sector industrial, en la fabricación de malla, cercos eléctricos, tendales, asas de baldes (AC, s.f.).

Aluminio

Fabricados a partir de aluminio, obtenido por refinación electrolítica con pureza de 99,5 %, conductividad mínima del temple suave 61,8 %; conductividad mínima del temple duro 61,2 %, como conductividad de referencia a la del cobre a 20°C (IACS) "Internacional Annealed Copper Standard" (CN, s.f.)

Alambre temple suave; bajo peso, excelente conductividad eléctrica, alta flexibilidad. Alambre temple duro; bajo peso, buena conductividad eléctrica, alta resistencia mecánica. Resistividad volumétrica a 20°C en (Ω mm² / m) suave 0, 027 899; duro 0, 028 264 (CN, s.f.).

El aluminio, por su mayor resistencia eléctrica, requiere un área mayor, por lo que se necesita una cantidad considerable de material de aislamiento para rodearlo, lo que puede redundar en un cable más costoso; por este y otros motivos, suele preferirse el conductor de cobre, ya que presenta un menor volumen total (Constructor eléctrico energy management, 2015a).

2.2.9.2. Ánodo

En el ánodo se producen los electrones, por eso es negativo, en el caso de las celdas galvánicas. En las celdas electrolíticas, como el proceso que ocurre es el inverso, el ánodo es positivo (Balocchi, et al., 2002a).

La oxidación, en cambio, ocurre siempre, siempre, en el ánodo, no importa si la celda es electrolítica o galvánica (Balocchi, et al., 2002b).

Es el electrodo en el que se lleva a cabo la oxidación (Chang, 2002, pág. 943).

Grafito

Los átomos de carbono son capaces de enlazar con otros átomos con hibridación sp, sp2 y sp3, por lo que puede generar una numerosa cantidad de moléculas estables. Debido a lo anterior, puede formar distintas formas moleculares o cristalinas, entre las que se encuentran el grafito, el diamante, nanotubos, grafenos y fulerenos (Li et al., 2011)

El grafito, como es bien conocido, presenta σ metálica perpendicular al eje c cristalográfico, es decir perpendicular al apilamiento de las láminas que lo componen, debido a una deslocalización electrónica de los electrones π en cada lámina. El grafito puede incorporar especies fuertemente electronegativas o electropositivas entre sus láminas, formando compuesto de intercalación y aumento su σ en dos órdenes de magnitud (Kaye & Underhill, 1989).

Cobre

La excelente conductividad hace del cobre uno de los materiales más utilizados en el sector eléctrico. Su resistencia a la electricidad es la más baja de todos los metales no preciosos, además de presentar diversas ventajas en el traslado de corriente (Constructor eléctrico energy management, 2015b).

Es verdad que existen muchos materiales que pueden conducir la electricidad en un cierto grado; sin embargo, para que uno de ellos sea el conductor óptimo, debe combinar una conductividad muy alta con importantes características mecánicas. En este sentido, los más utilizados son los metales (Constructor eléctrico energy management, 2015c).

Otra ventaja del cobre para aplicaciones bajo tierra es su alta resistencia contra la corrosión. Esta es la razón por la que las líneas aéreas en zonas costeras suelen construirse con cobre y no con aluminio. Asimismo, en casas y oficinas, el cobre se utiliza por razones prácticas; las terminales de conexión para

enchufes hechos de aluminio serían bastante grandes, lo que resulta poco práctico (Constructor eléctrico energy management, 2015d).

Por estas características excepcionales, el cobre tiene un impacto positivo en la capacidad del sistema eléctrico, en la reducción de los costos de operación y en la disminución de producción de gases de efecto invernadero (Constructor eléctrico energy management, 2015e).

2.2.10. Cálculos para la obtención de energía eléctrica en las bioceldas

Resistencia

La oposición que ofrece un material a la corriente se llama resistencia. El símbolo para la resistencia es R. Todos los materiales ofrecen cierta resistencia a la corriente. No obstante, existe una variación extrema en el valor de la resistencia que ofrecen diversos materiales. Es más difícil obtener electrones libres (portadores de corriente) en unos materiales que en otros. Se necesita más energía para liberar un electrón en materiales de elevada resistencia que en los de baja resistencia. La resistencia convierte la energía eléctrica en térmica cuando la corriente pasa a través de un material (Fowler, 1994a).

Resistividad

Según Serway & Faughn (2001), los electrones no siguen trayectorias en línea recta a lo largo de un conductor, sino que experimentan repetidos choques con los átomos metálicos. Considérese un conductor con un voltaje aplicado entre sus extremos. Un electrón adquiere rapidez cuando la fuerza cuando la fuerza eléctrica asociada con el campo eléctrico interno lo acelera y le imprime una velocidad en dirección opuesta a la del campo eléctrico. Un choque con un átomo dispersa al azar la velocidad del electrón y de esta manera reduce su velocidad en la dirección opuesta al campo. El proceso se repite entonces. Todas juntas, estas colisiones afectan al electrón un poco como lo haría una fuerza de fricción interna. Éste es el origen de la resistencia del material. La resistencia de un conductor óhmico es proporcional a su longitud, l, e inversamente proporcional a su área de sección transversal, A. Es decir,

$$R = \rho \frac{l}{\mathrm{A}} \qquad Ec.2$$

Donde a la constante de proporcionalidad, ρ, se le conoce como la resistividad del material. Todo material tiene una resistividad característica que depende de

su estructura electrónica y de la temperatura. Los buenos conductores eléctricos tienen resistividades muy pequeñas, y los buenos aisladores tienen resistividades muy grandes.

Resistividad y temperatura

Como menciona Serway & Beichner (2002), en un intervalo limitado de temperatura, la resistividad de un metal varía aproximadamente de manera lineal con la temperatura, de acuerdo con la expresión,

$$\rho = \rho o[1 + \alpha(T - To)] \qquad Ec.3$$

Donde ρ es la resistividad a cierta temperatura T (en grados Celcius), ρ_o es la resistividad a determinada temperatura de referencia T_o (que suele considerarse igual a 20°C) y α es el coeficiente de temperatura de resistividad. De acuerdo con la ecuación, se ve que el coeficiente de temperatura de resistividad puede expresarse como:

$$\alpha = \frac{1}{\rho o}\left(\frac{\Delta\rho}{\Delta T}\right) \qquad Ec.4$$

Donde $\Delta\rho = \rho - \rho_o$ es el cambio de resistividad en el intevalo de temperatura $\Delta T = T - T_o$.

Los coeficientes de temperatura de resistividad para los diversos materiales se proporcionan en la tabla 5. Advierta que la unidad para α es grado Celcius^{-1} (°C^{-1}). Puesto que la resistencia es proporcional a la resistividad, la variación de la resistencia puede escribirse como:

$$R = Ro[1 + \alpha(T - To)] \qquad Ec.5$$

Tabla 8. *Resistividades y coeficientes de temperatura de resistividad para varios materiales.*

Material	Resistividad (W.m)	Coeficiente de temperaturura α[(°C-1)]
Plata	1.59×10^{-8}	3.8×10^{-3}
Cobre	1.7×10^{-4}	3.9×10^{-3}
Oro	2.44×10^{-8}	3.4×10^{-3}
Aluminio	2.82×10^{-8}	3.9×10^{-3}
Tungsteno	5.6×10^{-8}	4.5×10^{-3}
Hierro	10×10^{-8}	5×10^{-3}
Platino	12×10^{-8}	3.92×10^{-3}
Plomo	22×10^{-8}	3.9×10^{-3}
Nicromo	1.5×10^{-6}	0.4×10^{-3}
Carbono	3.9×10^{-5}	-0.5×10^{-3}
Germanio	0.46	-48×10^{-3}
Silicio	640	-75×10^{-3}
Vidrio	10^{10} a 10^{14}	
Hule duro	$\approx 10^{15}$	
Azufre	10^{15}	
Cuarzo (fundido)	75×10^{16}	

Fuente: Serway & Beichner 2002.

Ley de Ohm

La relación entre la corriente (I), voltaje (V) y resistencia (R) fue descubierta por un científico alemán llamado Georg Ohm. Esta relación se llama ley de Ohm en su honor. Ohm halló que, cuando la resistencia se mantiene constante, la corriente en un circuito es directamente proporcional al voltaje. Mientras mantenía la resistencia constante, Ohm varió el voltaje en los extremos de la misma y midió la corriente que pasaba a través de ella. En cada caso, al dividir el voltaje por la corriente, el resultado era el mismo. Abreviadamente esto es la ley de Ohm (Fowler, 1994b).

La ley de Ohm puede expresarse como, “la corriente es directamente proporcional al voltaje e inversamente proporcional a la resistencia” (Fowler, 1994c).

Escrita como expresión matemática:

$$Corriente\ (I) = \frac{voltaje\ (V)}{resistencia\ (R)} \qquad Ec.6$$

$$Resistencia\ (R) = \frac{voltaje\ (V)}{corriente\ (I)} \qquad Ec.7$$

$$Voltaje\ (V) = corriente(I)\ x\ resistencia\ (R) \qquad Ec.8$$

Circuito eléctrico

El circuito eléctrico consta de una fuente de energía, dispositivos consumidores de ésta, conductores de conexiones e interruptores para cerrar el circuito. Al circuito eléctrico se suelen conectar aparatos para controlar la intensidad de la corriente y la tensión en sus distintos trozos, es decir, amperímetros y voltímetros (Bújovtsev, Klimontóvich, & Míákishev, 1986a).

Conexiones en serie de los conductores

Como me menciona Bújovtsev et al., (1986b) cuando la conexión se hace en serie, el circuito eléctrico no tiene ramificaciones. Todos los conductores van conectados en el circuito sucesivamente, es decir uno detrás de otro. La figura 5, muestra la conexión en serie de dos conductores, 1 y 2, cuyas resistencias son R_1 y R_2. Estos son conductores pueden ser dos lámparas, dos devanados de motor eléctrico, entre otros.

La intensidad de la corriente es igual en ambos conductores:

$$I_1 = I_2 = I \qquad Ec.9$$

Ya que, en el caso de la corriente continua, la carga eléctrica no se acumula en los conductores y a través de cualquier sección de ellos pasa la misma carga en un intervalo de tiempo determinado.

La tensión (o diferencia de potencial) en los extremos del trozo de circuito que se considera se compone de las tensiones en los conductores primero y segundo:

$$V = V_1 + V_2 \qquad Ec.10$$

Aplicando la ley de Ohm para todo el trozo y para los trozos cuyas resistencias son R_1 y R_2, puede demostrarse que la resistencia total de conexión en serie es:

$$\mathrm{R} = R_1 + R_2 \qquad Ec.11$$

Una fórmula análoga puede utilizarse para cualquier número de conductores conectados en serie.

Entre la tensión en los conductores y las resistencias de estos en una conexión en serie existe la relación siguiente:

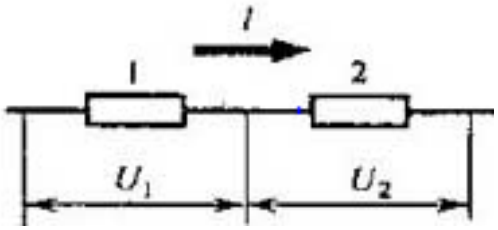


Figura 5. Conexión en serie de dos conductores (Fuente: Bujovtsev, 1982)

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{R_1}{R_2} \qquad Ec.12$$

Conexiones en paralelo de los conductores

Según Bújovtsev, et al., (1986c) la figura 6, muestra la conexión en paralelo de dos conductores, 1 y 2, cuyas resistencias son R_1 y R_2. En este caso la corriente eléctrica I se bifurca. La intensidad de la corriente en los conductores primero y segundo la designaremos respectivamente por I_1 y I_2.

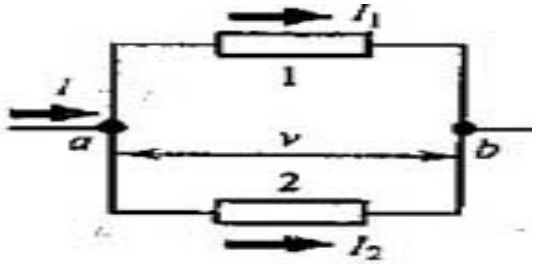


Figura 6. Conexión en paralelo de dos conductores (Fuente: Bujovtsev, 1982).

Como en el punto a, de bifurcación de los conductores (que recibe el nombre de nodo), la carga eléctrica no se acumula, la carga que llega al nodo en la unidad

de tiempo es igual a la carga que sale de él en el mismo tiempo. Por consiguiente,

$$I_1 = I_2 = I \qquad Ec.13$$

La tensión V en los conductores conectados en paralelo es la misma. Aplicando la ley de Ohm a los trozos cuyas resistencias son R_1 y R_2 puede demostrarse que la magnitud recíproca de la resistencia total del trozo ab es igual a la suma de las magnitudes recíprocas de las resistencias de los conductores por separado:

$$\frac{1}{\mathrm{R}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \qquad Ec.14$$

De aquí se sigue que:

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \qquad Ec.15$$

Fórmulas análogas a la 19 y 20 pueden aplicarse a las conexiones de un número cualquiera de conductores.

Entre las intensidades de la corriente en los conductores y sus resistencias en una conexión en paralelo existe la relación siguiente:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1} \qquad Ec.16$$

Potencia

Normalmente el voltaje E_{CCM} en una CCM es medido a través de una resistencia externa (R_{ext}), mientras que la corriente I_{CCM} se calcula mediante la Ley de Ohm:

$$I_{CCM} = \frac{E_{CCM}}{R_{ext}} \qquad Ec.17$$

Usualmente, el valor elegido de R_{ext} para la operación de la celda es la resistencia interna R_i de la CCM, puesto que con dicho valor la potencia generada en la CCM es máxima. Este resultado se conoce como Teorema de Jacobi para fuerzas electromotrices (Carmona, Esparza, García, Solorza, & Poggi, 2006).

La potencia para una celda se calcula de la siguiente manera:

$$P_{CCM} = I_{CCM} E_{CCM} \qquad Ec.18$$

Donde:

I_{CCM}: es la corriente máxima generado por la celda de combustible microbiana (CCM) en Amperios (A).

E_{CCM}: es el máximo voltaje generado por la CCM en Voltios (V).

P_{CCM}: es la potencia obtenida utilizando directamente las mediciones realizadas de la corriente y voltaje en Watts (W).

La corriente producida por una sola celda Microbial Full Cell (MFC) es pequeña y no suele medirse, sino que se calculará a partir de la resistencia externa y caída de tensión que provoca (Moreno, 2016).

$$P_{CCM} = \frac{E^2 ccm}{R_{ext}} \qquad Ec.19$$

Esta es la medida directa de la potencia eléctrica.

E^2_{ccm}: es el voltaje generado al cuadro.

R_{CCM}: es la resistencia mínima externa del circuito en Ohm (Ω)

P_{CCM}: es la potencia obtenida tomando en cuenta el valor de la resistencia.

Densidad de potencia

La potencia regular mente se normaliza con algunas características del reactor con el fin de comparar la potencia de salida de diferentes sistemas. La potencia de salida suele ser normalizada con respecto a la superficie del ánodo, debido a que es el lugar en donde se produce la reacción (Haberman & Pommer, 1991; Rabaey, Boon, Siciliano, Verhaege, & Verstraete, 2004).

La densidad de potencia:

Se calcula utilizando la superficie del ánodo (Aánodo) como:

$$P_{ánodo} = \frac{E^2 celda}{(A_{ánodo})(R_{ext})} \qquad Ec.20$$

Donde

E^2_{celda}: es el voltaje generado en la CCM.

$A_{ánodo}$: es la superficie del ánodo en m^2.

R_{ext}: es la resistencia del circuito en (Ω).

$P_{ánodo}$: es la densidad de potencia normalizada en (W/m2).

En los casos donde se calcula el tamaño y costo de los reactores como una comparación útil con respecto a las celdas de combustible la potencia se normaliza con el volumen del reactor:

$$P_V = \frac{E^2 ccm}{VR_{ext}} \qquad Ec.21$$

E^2_{ccm}: es el voltaje generado al cuadrado

V: es el volumen de la celda en m^3.

R_{ext}: es la resistencia del circuito en (Ω).

Pv: es la potencia normalizada con el volumen del reactor en (W/m^3).

Termodinámica de una celda de combustible microbiana

De acuerdo a Logan (2008) una pila de combustible microbiana, solo generará electricidad si la reacción global resulta termodinámicamente favorable. La reacción puede ser evaluada en términos de energía de Gibbs, que mide el máximo trabajo que puede derivar de una reacción:

$$\Delta G_r = \Delta G^0 r + RTln(ll) \qquad Ec.22$$

Donde ΔG_r es la energía libre en determinadas condiciones, $\Delta G^0{}_r$ es la variación de energía libre en condiciones estándar definidas como T= 298,15K, presión 1 bar y concentración 1M para todas las especies. R (8.31447 $J/mol{-}1\ K^{-1}$) es la constante universal de los gases, T (K) es la temperatura absoluta y ll el coeficiente de reacción calculado como la actividad de los productos dividido por la de los reactivos. La energía libre de Gibbs en sus condiciones estándar se encuentra tabulada.

En una MFC resulta en cambio más interesante estudiar una reacción en términos de fuerza electromotriz, definida como la diferencia de potencial entre ánodo y cátodo. Esta fuerza electromotriz se mide en Voltios y se relaciona con el trabajo de una celda de la siguiente manera:

$$W = E^o emf Q = -\Delta G_r \qquad Ec.23$$

Donde $Q = nF$ es la carga trasferida en las reacciones expresada en colombios que está determinada por el número de electrones intercambiados en la

reacción, n es el número de electrones por mol de reacción y F es la constante de Faraday (9.64853x104 C/mol).

Combinando estas dos ecuaciones y expresándolas en términos de reacción global se tiene:

$$E_{emf} = E^o emf - \frac{RT}{nF}\ln(ll) \qquad Ec.24$$

Energía eléctrica

En un circuito eléctrico se produce una serie de transformaciones de la energía. Durante el movimiento ordenado de las partículas cargadas en un conductor, el campo eléctrico realiza trabajo. Este trabajo se suele llamar trabajo de la corriente (Bújovtsev et al., 1986).

$$E = P(t) = kWh \qquad Ec.25$$

Donde

E: la energía eléctrica generada por el SCCM.

P: la potencia generada por la SCCM.

t: tiempo que la celda permanece activa.

2.3. Definición de términos básicos

Fotosíntesis: Etimológicamente fotosíntesis significa síntesis con ayuda de la luz; en realidad, consiste en un conjunto de reacciones que conducen a que las plantas iluminadas sinteticen su propia materia orgánica. El proceso es fundamental para la vida (Barceló, Nicolás, Sabater, & Sánchez, 2009).

Celdas galvánicas: Son aquellos dispositivos en los cuales se ponen en contacto dos electrodos o semiceldas diferente, mediante un puente salino y un alambre conductor de electricidad, de modo que se genera una corriente eléctrica continua y ocurre una reacción química redox espontánea (Yupanqui, Alcántara , Meléndez , & Chinchay, 2008).

Celdas de combustibles microbianas: En una celda MFC, la reacción catalítica de microorganismos ayuda a la transferencia de electrones liberados de la oxidación de compuestos orgánicos hacia un electrodo (conversión de energía química en energía eléctrica). Este tipo de celdas han alcanzado un importante

grado de avance científico y se ha propuesto que tendrían aplicación como dispositivos biomédicos implantados, entre otros usos (Valera, Solorza, & Hernández, 2010a).

Electrodos: El cátodo y el ánodo son electrodos donde se realizan diferentes reacciones: el oxígeno se reduce a iones óxido consumiendo dos electrones en el cátodo y el combustible se reduce formando dos electrones en el ánodo (Ivers-Tiffee, Weber, & Herbstritt, 2001).

Energía eléctrica: En un circuito eléctrico se produce una serie de transformaciones de la energía. Durante el movimiento ordenado de las partículas cargadas en un conductor, el campo eléctrico realiza trabajo. Este trabajo se suele llamar trabajo de la corriente (Bújovtsev et al., 1986).

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

El proyecto de investigación según el enfoque fue investigación cuantitativa, por su alcance descriptivo-correlacional, por el propósito o fines que persigue investigación aplicada (práctico o empérico), por la clase de medios utilizados para obtener los datos investigación documental, de campo y experimental y por el nivel de conocimiento que se adquieren investigación descriptiva y explicativa.

El diseño del sistema para la captura de los electrones, consistió de celdas galvánicas microbianas, basado en el método de la investigación de Rosa de Guadalupe González Huerta y Arturo Manzo Robledo y la investigación acerca de los principios básicos de una celda microbiana según H. M. Poggi Varaldo, A. L. Vasquez Larios, O. Solorza Feria.

3.2. UBICACIÓN, POBLACIÓN Y MUESTRA

3.2.1. Ubicación del estudio

El proyecto se desarrolló en el jardín botánico de Cacao (1), estación meteorológica (2) y Plantaciones de Palma Aceitera (3) de las instalaciones de la Universidad Nacional de Ucayali, ubicado en el distrito de Callería en la carretera Federico Basadre km 6.2, en la provincia de coronel Portillo, región Ucayali.

Tabla 9. *Coordenadas del área de estudio.*

ID	Este	Norte
1	546932	9070515
2	547110	9069963
3	547240	9069709

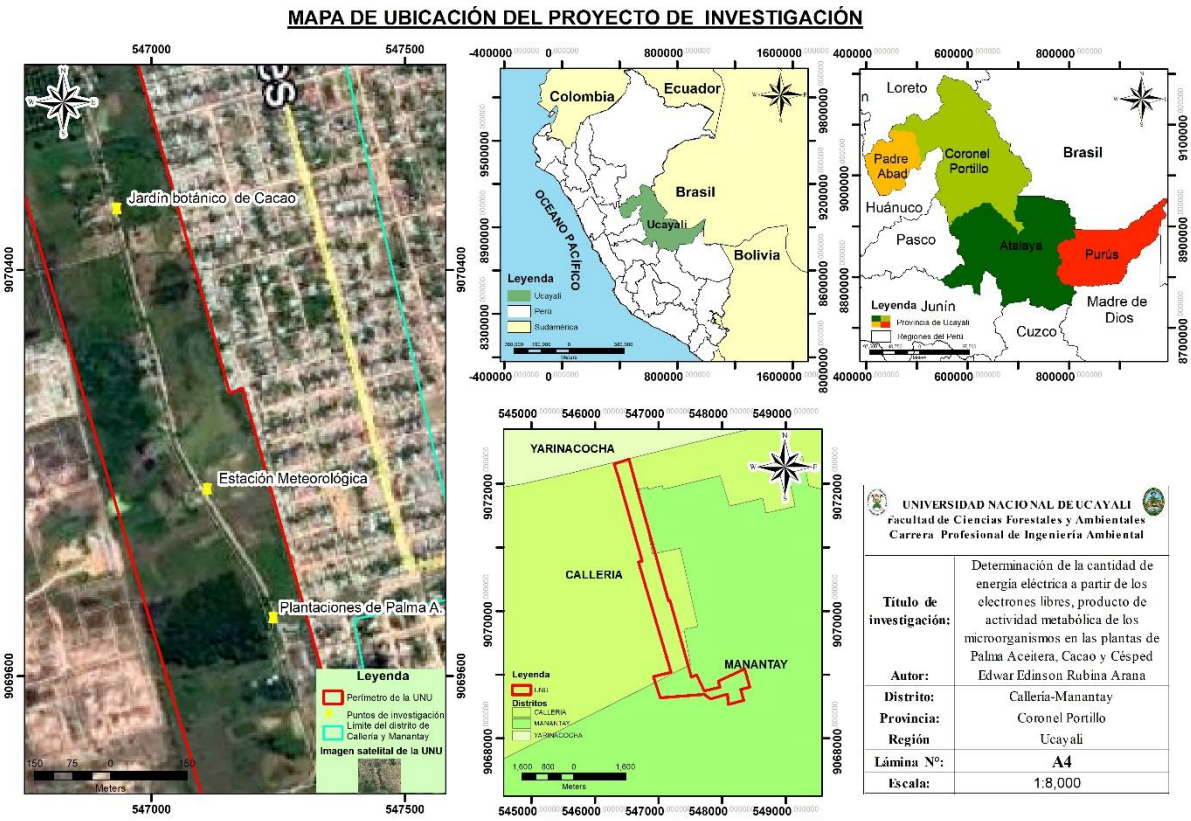


Figura 7. Mapa de ubicación de la Universidad Nacional de Ucayali "Área de estudio".

3.2.2. Población

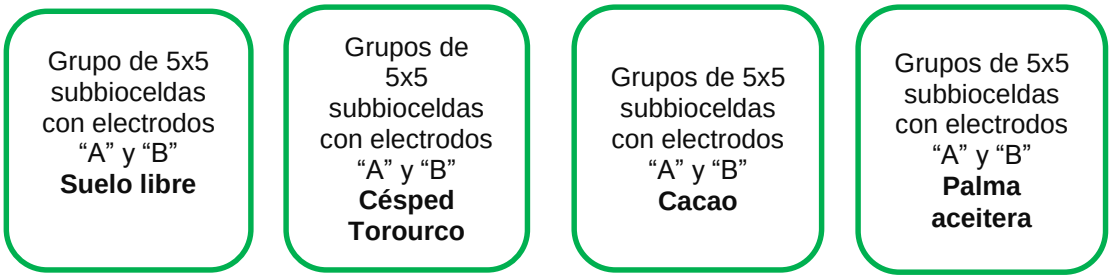
El área cubierta por plantas de Palma Aceitera, Cacao y Césped Torourco que se encuentran dentro de la Universidad Nacional de Ucayali “área de estudio”.



Figura 8. Población de Palma Aceitera, Cacao y Césped Torourco, (Fuente: Google, 2017).

3.2.3. Muestra

El tipo de muestreo fue probabilístico del tipo estratificado, se compuso por 6 m2 de suelo libre, 6 m2 de Césped Torourco, 6 m2 de área cubierta por plantas de Cacao. 6 m2 de área cubierta por plantas de Palma Aceitera.



3.3. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

Se realizó una investigación experimental del tipo experimentos puros, con un diseño factorial de 2x3 con un grupo de control y dos niveles, en el cual se tendrá 6 grupos experimentales y un grupo de control o testigo con dos niveles, el cual será sometido a 3 repeticiones de cada sistema de 5x5 subbioceldas; haciendo un total de 24 unidades experimentales considerado con electrodos de gafito y galvanizado (12) y electrodos de grafito y aluminio (12).

Diseño experimental factorial de 2x3 con un grupo de control de dos niveles

Diseño factorial 2x3.

	T1	T2	T3
Z1	T1Z1	T2Z1	T3Z1
Z2	T1Z2	T2Z2	T3Z2

Z1: electro de Grafito y Alambre Galvanizado; Z2: electro de Cobre y Aluminio

T1: Césped Torourco; T2: Cacao; T3: Palma Aceitera.

Diseño factorial 2x3 con tres (03) repeticiones.

	T1	T2	T3
Z1R1	T1Z1R1	T2Z1R2	T3Z1R1
Z1R2	T1Z1R2	T2Z1R2	T3Z1R2
Z1R3	T1Z1R4	T2Z1R5	T3Z1R6
Z2R1	T1Z2R2	T2Z2R3	T3Z2R4
Z2R2	T1Z2R2	T2Z2R2	T3Z2R2
Z2R3	T1Z2R3	T2Z2R3	T3Z2R3

R: repeticiones.

Diseño factorial 2x1 del grupo de control.

	T0
Z1	T0Z1
Z2	T0Z2

Diseño factorial 2x1 del grupo de control con tres (03) repeticiones.

	T0
Z1R1	T0Z1R1
Z1R2	T0Z1R2
Z1R3	T0Z1R3
Z2R1	T0Z2R1
Z2R2	T0Z2R2
Z2R3	T0Z2R3

T0: Grupo de control o testigo (Suelo libre).

3.4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Los datos fueron sometidos a análisis estadístico con el software SPSS 24, correlaciones de spearman y pearson, se analizó a nivel de confianza del 95%, posterior a ello se evaluó mediante medias para los gráficos.

3.5. INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

Materiales

- Botellas de plástico de agua cielo.
- Rollo de estaño.
- Tijeras.
- Cuter.
- Soporte de Cautín.
- Alambre galvanizado de 4 mm de diámetro
- Alambre de cobre de 4 mm de diámetro.
- Alambre de aluminio de 4 mm de diámetro.
- Pegamento para PVC.
- Cables de calibre 10.
- Pila Panasonic UM-3 tipo AA (R6) de 1.5 V.

Equipos

- Cautín.
- Multímetro.

- Batería AGM.
- Regulador de carga.
- Inversor de voltaje de 12 V a 220 V.
- Laltop.
- Cámara digital.
- Impresora.
- Ph metro digital.

Herramientas

- Pala.
- Pico.
- Desarmador.
- Machete.

Insumos

- Agua.
- Abono orgánico.
- Tierra negra.
- Carbón tamizado.
- **Otros**
- Copias.
- Combustible.
- Motocicleta.

3.6. PROCEDIMIENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

3.6.1. Adquisición de los materiales, equipos, herramientas e insumos

En esta primera etapa se adquirió los materiales, equipos, herramientas, insumos y otros componentes que ayudaron a la realización de esta actividad, de esta manera alcanzar los objetivos planteados en el proyecto. Cabe destacar que en esta actividad se acondiciono los electrodos para su posterior utilización en la construcción de la biocelda.



Figura 9. Alambre Galvanizado como Cátodo.



Figura 10. Grafito como Ánodo, de pilas AA.



Figura 11. Alambre de Aluminio como Cátodo.



Figura 12. Cable de Cobre como Ánodo.

Para el caso del grafito se adquirió pilas Panasonic de extra duración AA de 1.5 V, se extrajo los grafitos de cada pila, para el Aluminio se cortó en trozos de igual manera para el Alambre Galvanizado y Cobre en todos los caos se dimensionó a 4.7 cm de longitud.

3.6.2. Selección del área y acondicionamiento del lugar de trabajo

Se seleccionó teniendo en cuenta aquellas zonas con potencial de cultivos de Palma Aceitera, Cacao y Césped Torourco; ya que la investigación demandó de tres estratos vegetales para el desarrollo del mismo. Los cultivos situados en la Universidad Nacional Ucayali, área que se encuentra al margen derecho de este a oeste, de la pista de la Av. Túpac Amaru.

3.6.3. Selección de las muestras para la instalación del sistema de bioceldas



Figura 13. Palma Aceitera como estrato arbóreo.



Figura 14. Cacao como estrato arbustivo.



Figura 15. Césped Torourco como estrato herbáceo.



Figura 16. Suelo libre como testigo.

La selección de los cultivos de Cacao, Palma Aceitera y Toourco se realizó de acuerdo al criterio del investigador (no probabilístico), ya seleccionados las 6 plantas por estrato, se procedió a la limpieza de las muestras seleccionadas ya que existió presencia de malezas alrededor de los cultivos seleccionados; para esta actividad se utilizó machete, pico, azadón, pala, entre otras herramientas manuales.

3.6.4. Diseño y construcción de bioceldas

Se realizó la soldadura de cable y electrodo, cátodo (-) Alambre Galvanizado y Aluminio, ánodo (+) Grafito y Cobre, con dimensiones de

4.7 cm de longitud cada electrodo, para las subbioceldas se utilizaron botellas cortadas de a 10 cm de altura a partir de la base.

Cada electrodo fue soldado con estaño al terminal del cable calibre 22, posteriormente aislado con silicona caliente, para evitar la oxidación y sulfatación de los cables y garantizando la lectura correcta de los parámetros de voltaje y corriente.



Figura 17. Electrodo de Grafito.

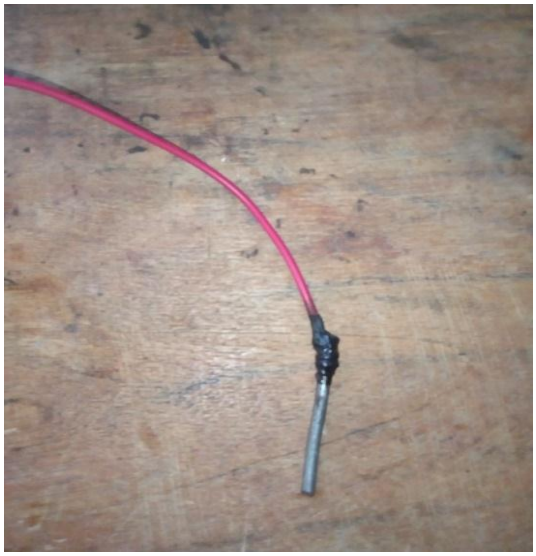


Figura 18. Electrodo de Alambre Galvanizado.



Figura 19. Electrodo de Cobre.

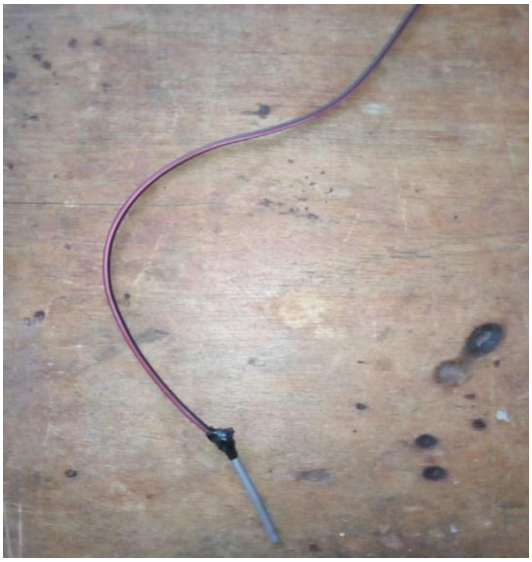


Figura 20. Electrodo de Aluminio.

El sistema de bioceldas, para el caso de todas las bioceldas, se dimensionó de acuerdo a la siguiente figura 21.

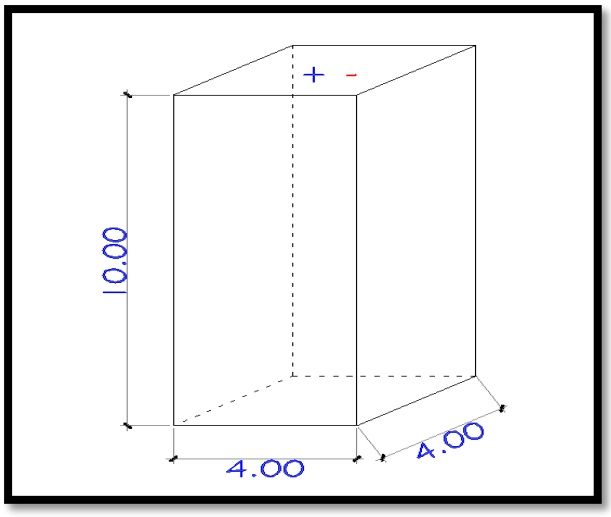


Figura 21. Diseño de la biocelda, con cátodo (-) y ánodo (+).

Sistema de bioceldas de 5x5 subbioceldas

Se adecuaron 6 de este primer prototipo, con botellas de PET como aislante de cada subbiocelda, resistente y firme para que cada subbiocelda de la biocelda de tal manera que se logró formar sistemas independientes, El sistema se compuso de 25 subbioceldas.

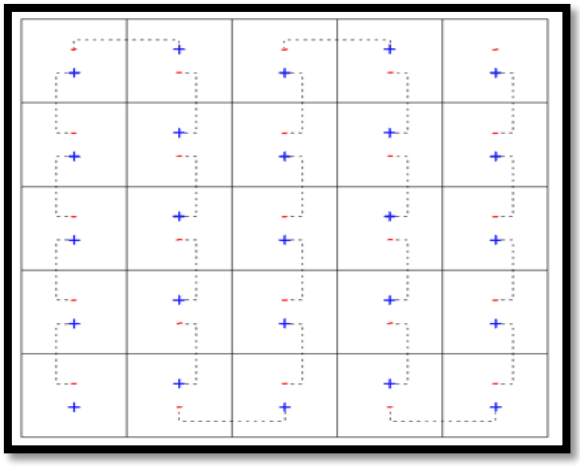


Figura 22. Vista de planta de la biocelda de 5x5 grupos de subbioceldas, circuito en serie.

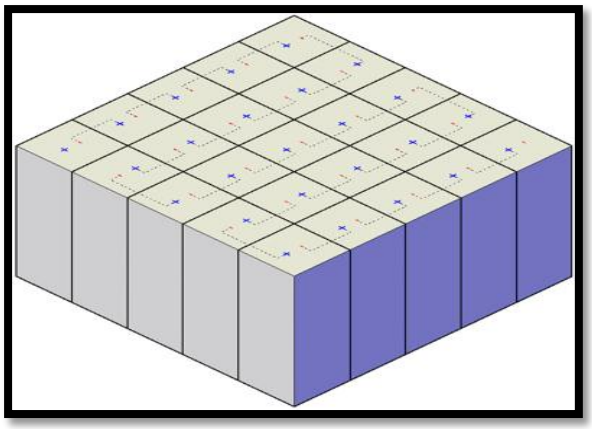


Figura 23. Biocelda de 5x5 grupos de subbioceldas, circuito en serie.

3.6.5. Instalación de la biocelda experimental y electrodos



Figura 24. Instalando bioceldas en Palma Aceitera.



Figura 25. Preparando suelo para instalar bioceldas en Cacao.



Figura 26. Instalando bioceldas en Césped Torourco.



Figura 27. Preparando suelo libre para la instalación de bioceldas.

Se instaló en cada biocelda en cada estrato vegetativo, el sistema de 5x5 con, una tela que permitío aislar y dejar un espacio entre bioceldas y superficie, electrodos de grafito (+) y alambre galvanizado (-) y el siguiente con electrodos de cobre (+) y aluminio (-), se instalaron en la planta de Palma Aceitera, Cacao, Césped Torourco y Suelo libre.



Figura 28. Raíces de Palma A. colonizadas en las bioceldas.



Figura 29. Instalando electrodos en las bioceldas de Palma A.

En el caso de Palma Aceitera se desenterro las celdas y las raíces cortadas habían enraizado la tela pasando hacia la biocelda, que es lo que se estaba esperando para que las raíces segreguen los exudados radiculares, posterior a eso se instaló los electrodos.



Figura 30. Enraizamiento de Césped Torourco en las bioceldas.



Figura 31. Instalación de Electrodos en Césped Torourco.

Del mismo modo se marcó con una poseadora el área instala para extraer el volumen de Césped Torourco, las raíces colonizaron las celdas pasando la tela, luego se insertó cada electro en las bioceldas.



Figura 32. Enraizamiento de Cacao en las bioceldas.



Figura 33. Instalación de electrodos en Cacao.

Se desmontó la tierra que cubría la biocelda, de igual forma las raíces de Cacao se adaptaron y pasaron a traves de la tela hacia las bioceldas, en esta planta no hubo mucha presencia de raíces, posteriormente se instalaron los electrodos dejando 5 cm dese la tela hasta la superficie, para garantizar la medición.



Figura 34. Bioceldas y electrodos en suelo libre.

En el caso de suelo libre se limpió el suelo excedente para instalar los electrodos, lo que se encontró fue pequeas raíces de las especies predominantes.

Luego de 3 meses se acondicionó en cada subbiocelda los electrodos (cátodo y ánodo), electrodos de Grafito (+) y Alambre Galvanizado (-) y el siguiente con electrodos de Cobre (+) y Aluminio (-), dejando una longitud de 5 cm de cable hacia el exterior para realizar la medición del voltaje y corriente.

3.6.6. Medición de parámetros y toma de datos de las bioceldas



Figura 35. Medición de Voltaje y corriente en Suelo libre



Figura 36. Medición de voltaje y corriente en Césped Torourco.



Figura 37. Medición de voltaje y corriente en Cacao.



Figura 38. Medición de voltaje y corriente en Palma A.

La medición del voltaje y corriente de cada subbiocelda instalado en cada estrato vegetativo, fue durante 7 días, 2 veces al día, de 7 am a 12 pm y de 2 pm a 5 pm; la medición y lectura de los parámetros fue instantánea, haciendo un total de 75 datos de voltaje y 75 de corriente para electrodos de Grafito con Alambre Galvanizado y 75 de voltaje y 75 para Cobre con Aluminio en un estrato por turno y en 1 día (dos turnos, mañana y tarde); la medición se realizó con multímetro en cada subbiocelda.

En total se registró: 16800 datos de voltaje y amperaje para electrodos de Grafito (+) y Alambre Galvanizado (-), en la planta de Palma, Cacao y Césped Torourco, durante la medición de 7 días en dos turnos mañana y tarde, haciendo un total de 16800 datos recolectados en 14 días de evaluación.



Figura 39. Estación meteorológica de la UNU.

Se recolectó datos de precipitación, heliofonía, temperatura ambiental y humedad de la estación meteorológica de la Universidad Nacional de Ucayali.



Figura 40. Muestreo de Suelo en Césped Torourco.



Figura 41. Muestreo de suelo en Cacao.



Figura 42. Muestreo de suelo de Palma A.

Se realizó el muestreo de suelo y envío al laboratorio de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, para analizar los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de cada tratamiento.

3.6.7. Cuantificación del rendimiento o capacidad de la biocelda

En esta actividad se procedió a la cuantificación del rendimiento de cada subbiocelda instalada según tipo de electrodo y estrato vegetal, con las siguientes fórmulas.

Se realizó el cálculo de potencia, capacidad de la biocelda y energía eléctrica generada, a partir de los parámetros de voltaje y corriente registrados.

Se utilizó el método numérico y analítico para determinar los parámetros eléctricos:

Potencia:

$$\boldsymbol{P = V * I = (W)}$$

Donde:

P: es potencia de generada con la biocelda; V: voltaje medido con multímetro.

I: corriente medido con multímetro.

Densidad de Potencia:

$$\boldsymbol{Dp = \frac{P}{A} = (\frac{W}{m^2})}$$

Dp: densidad de potencia generada con la biocelda; A: es el área de la subbiocelda.

Energía eléctrica

$$\boldsymbol{Eeb = P * t = Wh}$$

Eeb: energía eléctrica generada con la biocelda.

Costo de producción

$$\boldsymbol{C = Q * Pu = soles}$$

C: costo de producción en soles; Q: es la demanda del producto.

Pu: es el precio unitario de Q.

3.6.8. Análisis e interpretación de datos

Para esta actividad se realizó un análisis de los datos procesando con el software Excel, con gráficos.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Energía eléctrica a partir de electrones libres, producto de la actividad metabólica de los microorganismos, en las plantas de palma aceitera (Elaeis guineensis), cacao (Theobroma cacao) y césped torourco (Axonopus compresus)

Los valores de la tabla 10 y figura 43 muestra que los electrodos de Grafito y Alambra Galvanizado manifestaron mayor energía eléctrica en Cacao con un valor de 1.86 mWh, seguido por Césped Torourco, Suelo libre y Palma Aceite y para el caso de la energía eléctrica con electrodos de Cobre y Aluminio el mayor valor fue obtenido en el testigo (Suelo libre) con 0.24 mWh, seguido por Césped Torourco, Palma Aceitera y Cacao.

Esto valores obtenidos de acuerdo a la disponibilidad de microorganismos y sustrato (materia orgánica) como reporta Góngora, Ocha, Sosa & Vásquez (2017), ya que la mayor cantidad de materia orgánica, función microbiana y arquitectura de la biocelda garantiza un mejor desempeño eléctrico (Revelo, Hurtado, & Ruiz, 2013).

***Tabla 10**. Enegía eléctrica generada en los diferentes estratos vegetativos y electrodos.*

Tratamiento	Cultivo	Energía eléctrica (mWh)	
		Grafito y A. Galvanizado	Cobre y Aluminio
T0	Suelo Libre	0.62	0.24
T1	Césped Torourco	0.54	0.19
T2	Cacao	1.86	0.12
T3	Palma Aceitera	0.33	0.13

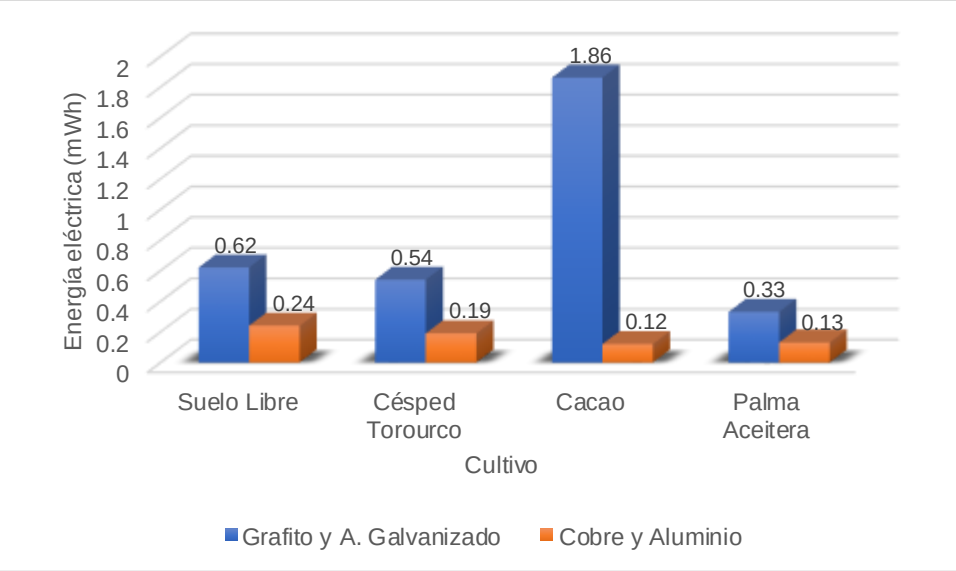


Figura 43. Energía eléctrica obtenido en Suelo libre, Césped Torourco, Cacao y Palma Aceitera con dos electrodos diferentes.

El ANOVA de la tabla 16 y 17, muestra para la energía eléctrica con electrodos de Grafito y Alambre Galvanizado, muestra que hay diferencias significativas entre las medias de la energía eléctrica a un nivel de confianza del 95% para Suelo libre, Césped Torourco, Cacao y Palma Aceitera, por consiguiente, la prueba de HSD Tukey muestra la mayor energía en el siguiente orden Cacao, suelo libre, Césped Torourco y Palma Aceitera.

Por otro lado, la tabla 18 y 19 mediante la prueba de ANOVA para la energía eléctrica obtenida con electrodos de Cobre y Aluminio, muestra que existe diferencias significativas entre los tratamientos, el orden siguiente, Suelo libre, Césped Torourco, Palma Aceitera y Cacao, según la prueba de HSD Tukey.

En el tratamiento de Suelo libre y Palma Aceitera, la prueba de Levene asume varianzas iguales, y la prueba de T de student muestra que existe diferencias significativas con 0.0 a un nivel de confianza del 95% en la media obtenida para la energía eléctrica con electrodos de Grafito y Alambre Galvanizado, Cobre y Aluminio, mostrado en la tabla 20.

En el tratamiento de Césped Torourco y Cacao, la prueba de Levene no asume varianzas iguales, y la prueba de T de student muestra que existe diferencias significativas con 0.008 y 0.00 respectivamente a un nivel de confianza del 95% en la media obtenida para la energía eléctrica con electrodos de Grafito y Alambre Galvanizado, Cobre y Aluminio en la tabla 20.

4.1. Estrato vegetativo, electrodos, horario de medida, condiciones del suelo que propicia una mejor en la generación de electrones libres

4.1.1. Estrato vegetativo, electrodos y horario de medida según voltaje y corriente

El suelo libre careció de raíces debido a que no hay plantas, sin embargo, el área donde se instaló las bioceldas es ruta de los ganados por donde suelen pasar y depositar su excremento, existiendo presencia de pastos pioneros alrededor de la zona.

El estrato vegetal al que pertenece el césped torourco es herbáceo por sus cualidades como forraje y formadora de céspedes, crece en suelos húmedos, en sabanas, en arenas blancas, campos de pastoreo, claros de bosque, bordes de camino, terrenos de cultivo y su altitud oscila de 0 a 3 metros (Giraldo, 2014).

La planta de cacao es un árbol o arbusto semicaducifolio, debido a la morfología como destaca (Dostert, Roque, Cano, La Torre, & Weigend, 2012). El cacao puede ser cultivado en diferentes tipos de suelo. Generalmente necesita suelos profundos, livianos y ricos en nutrientes. El perfil de suelo debe alcanzar una profundidad de 1(—1.5) m, para que la raíz pivotante y todo el sistema radicular pueda formarse bien (De la Cruz, Whitkus, Gómez, & Mota, 1995).

La Palma Aceitera pertenece al estrato vegetativo arbóreo, posee un sistema radicular fasciculado compuesto por raíces primarias, secundarias, terciarias y cuaternarias (Reyes, Bastidas, & Peña, 1997).

Voltaje

La figura 44 muestra que se obtuvo un valor de 0.397 V y 0427 V en Suelo Libre, 0.351 V y 0.378 V en Césped Torourco, 0.509 V y 0.314 V en Cacao, 0.38 V y 0.394 V en Palma Aceitera para electrodos de Grafito y A. Galvanizado, y Cobre y Aluminio respectivamente, Góngora Ochoa, Sosa & Vásquez (2017) en un trabajo similar encontró valores de 0.134 V, 0.105 V, 0.112 V y 0.121 V en Árbol de la abundancia, Bugambilia, la Menta y Vicaria respectivamente, siendo estos valores muy por debajo de los encontrados en esta investigación, sin embargo aplicando celdas de combustible microbianas en depuración de agua residuales se reportó un valor máximo de 0.66 V (Buitrón & Pérez, 2011).

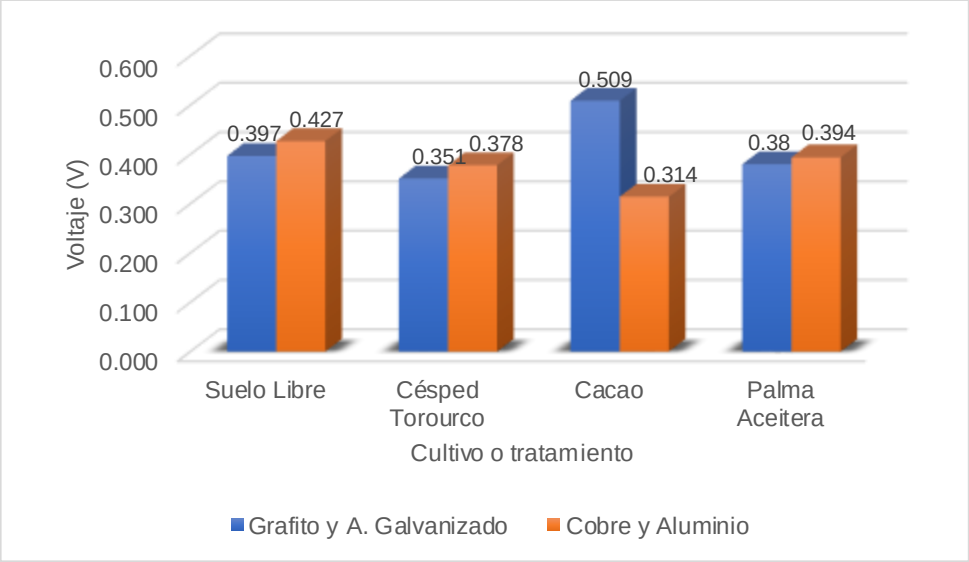


Figura 44. Voltaje obtenido en Suelo libre, Césped Torourco, Cacao y Palma Aceitera con dos electrodos diferentes.

En la tabla 23 y 24, la prueba de ANOVA para el voltaje muestra que existe diferencia significativa con 0.001 a un nivel de confianza de 95% para el tratamiento en Cacao, Suelo libre, Palma aceitera y Césped Torourco, para Grafito y A. Galvanizado; sin embargo, para los electrodos de Cobre y Aluminio no existe diferencias significativas de acuerdo a la tabla 27.

Como respalda la tabla 21, el estadístico de Levene asumen varianzas iguales y la prueba T de student muestra que existe diferencias significativas de 0.23 con un nivel de confianza del 95%, en la varianza de las medias del voltaje obtenido con electrodos de Grafito y A. Galvanizado, y Cobre y Aluminio, siendo este último el que mayor voltaje generó en Suelo libre.

En la tabla 21, la prueba de Levene asume que las varianzas son iguales, y el Test t de student para el voltaje, muestra que no existe diferencias significativas a un nivel de confianza del 95% en la media obtenido con electrodos de Grafito y A. Galvanizado, y Cobre y Aluminio, siendo este primero el que mayor voltaje generó en Césped Torourco.

En la tabla 21, la prueba de Levene asume varianzas iguales y el estadístico t de student para el voltaje, muestra que existe diferencia significativa de 0.00 a un nivel de confianza del 95% en la media obtenida con electrodos de Grafito y A. Galvanizado, y Cobre y Aluminio, siendo este primero el que mayor voltaje manifestó en Cacao.

Como respalda la tabla 21, la prueba Levene asume varianzas iguales y el estadístico t de student para el voltaje, muestra que no existe diferencia significativa a un nivel de confianza del 95% en la media obtenida con electrodos de Grafito y A. Galvanizado, y Cobre y Aluminio, siendo este segundo el que mayor voltaje manifestó en Palma Aceitera.

Corriente

Se obtuvo un valor en la Corriente de 0.066 mA y 0.024 mA en Suelo Libre, 0.059 mA y 0.021 mA en Césped Torourco, 0.152 mA y 0.016 mA en Cacao, 0.036 mA y 0.014 mA en Palma Aceitera para electrodos de Grafito y A. Galvanizado, y Cobre y Aluminio respectivamente, los electrones fueron desprendidos por la metabolización de los microorganismos identificados en cada estrato o tratamiento.

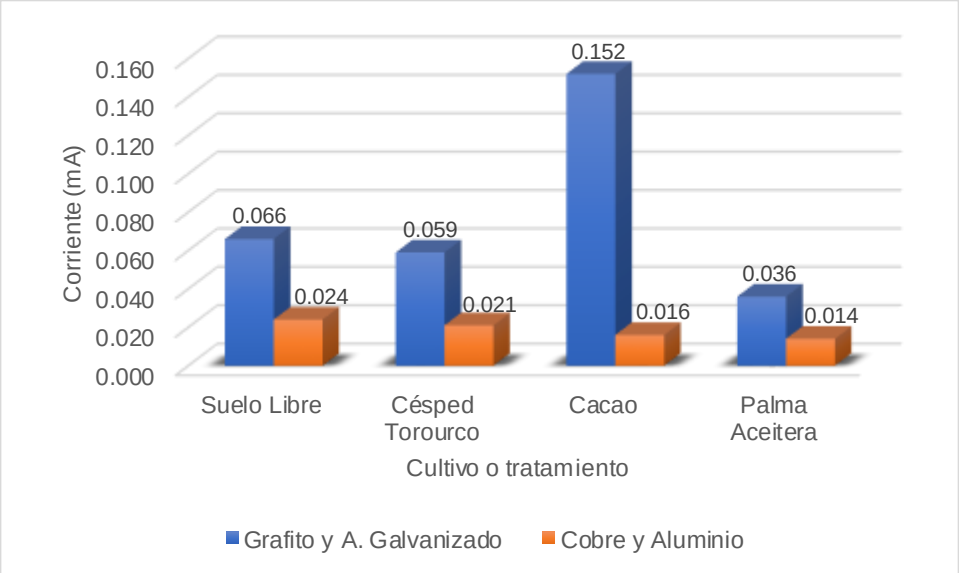


Figura 45. Corriente obtenido en Suelo libre, Césped Torourco, Cacao y Palma Aceitera con dos electrodos diferentes.

En la tabla 25 y 26, prueba de ANOVA y Tukey para la corriente muestra que existe diferencia significativa con 0.000 a un nivel del 95% con Grafito y A.

Galvanizado encontrando el mayor voltaje para Cacao, seguido por Suelo libre, Palma aceitera y Césped Torourco; no existiendo diferencia significativa para los electrodos de Cobre y Aluminio mostrado en la tabla 28.

En la tabla 22, se asume varianzas iguales para la prueba de Levene y el estadístico t de student para la corriente, muestra que existe una diferencia significativa de 0.23 a un nivel de confianza del 95%, en la varianza de las medias obtenido con electrodos de Grafito y A. Galvanizado, y Cobre y Aluminio, siendo este primero el que mayor corriente captó en Suelo libre.

En la tabla 22, el Test de Levene no asume varianzas iguales y el estadístico t de student para la corriente, muestra que existe diferencia significativa de 0.01 a un nivel de confianza del 95% en la media obtenida con electrodos de Grafito y A. Galvanizado, y Cobre y Aluminio, siendo este primero el que mayor corriente manifestó en Césped torourco.

De acuerdo a la tabla 22 el Test de Levene no asume varianzas iguales y la prueba estadística t de student para la corriente, muestra que existe diferencia significativa de 0.00 a un nivel de confianza del 95% en la media obtenida con electrodos de Grafito y A. Galvanizado, y Cobre y Aluminio, siendo este primero el que mayor corriente manifestó en Cacao.

En la tabla 22 el test de Levene no asume varianzas iguales y la prueba estadística t de student para la corriente, muestra que existe diferencia significativa de 0.00 a un nivel de confianza del 95% en la media obtenida con electrodos de Grafito y A. Galvanizado, y Cobre y Aluminio, siendo este segundo el que mayor corriente manifestó en Palma Aceitera.

No existe relación estadística entre voltaje y estrato arbóreo (Palma Aceitera), arbustivo (Cacao) y herbáceo (Césped Torourco), por tanto, no importa el tipo de estrato, el voltaje se mantendrá levemente constante.

Existe ínfima relación estadística entre corriente, potencia, energía eléctrica y estrato arbóreo (Palma Aceitera), arbustivo (Cacao) y herbáceo (Césped Torourco), estableciendo que depende del estrato para obtener mayor corriente, potencia y energía eléctrica.

No existe relación estadística entre el voltaje, corriente, potencia, densidad de potencia, energía eléctrica y horario de medición, donde los parámetros eléctricos

no son afectados por el horario de mañana o tarde en función a la condición climática del día.

Existe ínfima relación estadística entre voltaje y el tipo de electrodo, sin embargo, es muy buena la relación entre la corriente y el tipo de electrodo, la relación es buena entre la potencia, densidad de potencia, energía eléctrica obtenida y el tipo de electrodos (Grafito con A. Galvanizado y Cobre con Aluminio), estableciendo, que existe una dependencia del tipo de electrodo utilizado para obtener mayor voltaje, corriente, potencia y energía eléctrica, como menciona Hou, Hu, & Sun (2012), donde observó diferencias en cuanto al desempeño eléctrico de las Celdas de Combustibles Microbianas, debido al material de electrodos utilizados.

4.1.2. Condiciones que favorecen el aporte de energía eléctrica

Parámetros físicos del suelo

Tabla 11.*Parámetros físicos del suelo.*

Planta/Parámetro	Suelo Libre	Césped Torourco	Cacao	Palma Aceitera	Unidad
Textura	Franco	Franco	Franco	Franco	---
Densidad aparente	1.4	1.4	1.4	1.4	g/cm3
Capacidad de campo	25	24	22	23	% Hd peso
Punto de marchitez	8	7.8	7.8	7.7	% Hd peso
Temperatura del suelo	32	28	32	28	°C

La relación estadística entre el voltaje y la temperatura del suelo es ínfima, no habiendo relación para la corriente, potencia y energía eléctrica, una ventaja importante de las CCM es que pueden producir electricidad a partir de materia orgánica, operando a temperaturas moderadas, como son 20-40ºC (Min & Logan, 2004).

La capacidad de campo no influye en el voltaje, existiendo escasa relación estadística entre la corriente, potencia y energía eléctrica.

El punto de marchitez no influye en la corriente, potencia y energía eléctrica, existiendo ínfima relación estadística entre voltaje.

No existe relación estadística entre la densidad aparente y voltaje, corriente, potencia, densidad de potencia y energía eléctrica, debido a que el valor de la densidad es constante.

No se existe relación estadística entre voltaje, corriente, potencia, densidad de potencia, energía eléctrica y textura del suelo debido a que fue constante en las pruebas experimentales.

Parámetros químicos del suelo

Tabla 12. *Parámetros químicos del suelo.*

Planta/Parámetro	Suelo Libre	Césped Torourco	Cacao	Palma Aceitera	Unidad
Conductividad eléctrica	0.1	0.05	0.16	0.04	mS/cm
pH	4.1	5.11	5.33	4.64	
Materia orgánica	0.9	0.9	1.19	0.75	%
Nitrógeno	0.04	0.04	0.05	0.03	%
Fósforo	3.4	5.99	6.39	4.4	ppm
Potasio	51.98	72.47	88.46	55.98	ppm
Cadmio	0.084	0.08	0.1	0.084	ppm
Calcio	1.78	2.29	2.99	1.83	Cmol(+)/Kg
Magnesio	0.8	0.87	1.16	0.81	Cmol(+)/Kg
Aluminio	5.7	0.69	0.4	1.3	Cmol(+)/Kg
Hidrógeno	0.3	0.01	0.1	0.1	Cmol(+)/Kg
CIC efectiva	8.58	3.85	4.65	4.04	meq/100g
Base cambiables	30.04	81.83	89.24	65.33	%
Ácidos cambiables	69.96	18.17	10.76	36.67	%
Saturación de aluminio	65.47	17.91	8.61	32.19	%

Existe ínfima correlación estadística con un nivel de confianza al 99% entre el voltaje y la conductividad eléctrica, sin embargo, este último tiene moderada correlación con la corriente, potencia y energía eléctrica.

No existe relación estadística entre el voltaje y pH, sin embargo, la relación es escasa estadísticamente entre este último y la corriente, potencia y energía eléctrica, ya que las condicione de pH son un factor clave en el crecimiento de los microorganismos. La mayoría de las bacterias entéricas no toleran niveles de pH

arriba de 7,5 o debajo de 4,0. Además, valores de pH por debajo de 6,8 inhiben la actividad metanogénica (Metcalf & Eddy, 2003).

La materia orgánica tiene ínfima relación con el voltaje, como menciona Alzate, Fuentes, Álvarez, & Sebastian (2008), el voltaje disminuye gradualmente a medida que la materia orgánica contenida en el inóculo es consumida, pero tiene relación moderada con la corriente, potencia y energía eléctrica; entonces, mientras que el sistema contenga mayor materia orgánica mayor será la energía eléctrica, ya que habrá disponibilidad de microorganismos en el suelo que descompongan estos compuestos, Choi, Kim, Kim, & Jung, 2003; Bond & Lovley, 2003; Chaudhuri & Lovley, 2003, establecen que existe claras diferencias en cuanto al desempeño eléctrico de las Celdas de Combustible Microbiana por el sustrato.

No existe relación estadística entre el Nitrógeno y voltaje, corriente, potencia y energía eléctrica.

No existe relación estadística entre el Fósforo y voltaje, sin embargo, la relación es escasa estadísticamente entre el Fósforo y la corriente, potencia y energía eléctrica.

No existe relación estadística entre el Potasio y voltaje, sin embargo, la relación es escasa y moderada estadísticamente entre Potasio y corriente, potencia y energía eléctrica respectivamente.

El contenido de cadmio tiene ínfima relación con el voltaje, pero tiene relación moderada con la corriente, potencia y energía eléctrica; entonces, mientras que el sistema contenga mayor cadmio mayor será la energía eléctrica.

No existe relación estadística entre el magnesio y voltaje, sin embargo, la relación es moderada estadísticamente entre magnesio y la corriente, potencia y energía eléctrica.

No existe relación estadística entre el Aluminio y la corriente, sin embargo, la relación es ínfima estadísticamente para el voltaje, potencia y energía eléctrica, respecto al Aluminio con un nivel de confianza del 99%.

No existe relación entre el Hidrógeno y la corriente, potencia, energía eléctrica, sin embargo, existe ínfima relación estadística entre el Hidrógeno y voltaje.

La capacidad de intercambio catiónico tiene ínfima relación estadística con el voltaje, en un nivel de confianza del 99%, no influenciando en el valor obtenido de corriente, potencia y energía eléctrica.

Las bases y ácidos cambiables no afectan el voltaje estadísticamente, sin embargo, este primero tiene una ínfima y moderada relación con la corriente y la potencia respectivamente, el segundo se relaciona escasamente con la corriente y la potencia.

La saturación de Aluminio no influye estadísticamente en el voltaje, sin embargo, influye en escasamente en la corriente, potencia y energía eléctrica.

Parámetros microbiológicos del suelo

Tabla 13. *Parámetros microbiológicos del suelo.*

Microorganismos	Suelo Libre	Césped Torourco	Cacao	Palma Aceitera	Valor referencial	Unidad
Enum. de bacterias heterotróficas aerobias	56x10^3	48x10^3	63x10^3	8x10^3	3-7x10^3	UFC/g
Enum. de bacterias heterotróficas anaerobias	31x10^3	25x10^3	88x10^3	10x10^3	3-7x10^3	UFC/g
Enum. de Actinomicetos	9x10^3	86x10^3	88x10^3	53x10^3	2-3x10^3	UFC/g
Enum. de Fungi (Moha y Levaduras)	1x10^3	1x10^3	5x10^3	2x10^3	1-3x10^3	UFC/g
Enum. De Lactobacillus	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	2-3x10^3	m.o/g
Micorrizas	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	micelial/g

La mayor influencia de los microorganismos se presentó en el ecosistema de la planta de Cacao, donde se obtuvo la mayor densidad de potencia, (Rabaey & Verstraete, 2005), establecen que los microorganismos tienen influencia en el desempeño eléctrico de las Celdas de Combustible Microbiana.

Las bacterias heterotróficas aerobias no tienen relación con el voltaje, pero tienen escasa relación estadística a un nivel de confianza del 99% con la corriente, potencia y energía eléctrica, estas son consumidoras de oxígeno y materia

orgánica, originan condiciones anaerobias en las capas más profundas, donde van a residir los distintos grupos de bacterias anaerobias (Fernández, 2002; Pearl, 2019).

Existe ínfima relación estadística entre las bacterias heterotróficas anaerobias y el voltaje, pero la relación es moderada para la corriente, potencia y energía eléctrica, estas cuentan con un metabolismo que genera su energía a partir de sustancias que carecen de oxígeno, lo hacen generalmente a través de procesos de fermentación, comprende una serie de procesos, que interactúan entre sí, en una serie de reacciones metabólicas complejas en ausencia de oxígeno, haciendo parte importante de los ciclos biogeoquímicos del carbono, nitrógeno y azufre, entre otros (Censtanza, Antolinez, Bohórquez, & Corredor, 2015; Schink, 1997).

Las actinobacterias o actinomicetos no influyen en el voltaje, pero tiene ínfima y escasa relación estadística para la corriente y potencia, energía eléctrica respectivamente, porque cumplen rol en la descomposición de la materia orgánica y el ciclo del carbono mediante la producción de diversas enzimas hidrolíticas y ligninolíticas (Usha, Hema, & Kanchana, 2011; Hogan, 2010).

Existe ínfima relación estadística entre Fungi (Moho y levaduras) y el voltaje, pero la relación es escasa y moderada para la corriente y potencia, energía eléctrica respectivamente, la mayoría de los hongos no son percibidos a simple vista, pueden estar presentes en el suelo, la materia muerta, y formando simbiosis con plantas, animales, u otros organismos. Cumplen una función esencial en la descomposición de la materia orgánica y son indispensable en el ciclo de nutrientes (Ruiz, 2001).

No hubo presencia de bacterias del tipo lactobacilus.

No existe relación estadística entre la presencia de micorriza y los parámetros eléctricos, ya que el mismo valor se presentó en todos los casos.

Parámetros atmosféricos

Tabla 14. *Parámetros atmosféricos.*

Planta/Parámetro	Suelo Libre	Césped Torourco	Cacao	Palma Aceitera	Unidad
Temperatura ambiental	32	30	32	28	°C

Precipitación	7	7	7	7	mm
Heliofonía	4	4	4	4	Hora sol
Humedad ambiental	66	76	74	87	%

El análisis estadístico de los parámetros eléctricos fue al 99% de confiabilidad. Existe ínfima relación estadística entre voltaje, corriente y la temperatura, la relación es escasa entre la potencia, energía eléctrica y la temperatura ambiental, existiendo una influencia baja de la temperatura ambiental para obtener mayor corriente, potencia y energía eléctrica.

No existe relación estadística entre la precipitación, heliofonía y el voltaje, corriente, potencia, densidad de potencia, energía eléctrica, no dependen de estos factores ambientales para obtener corriente, potencia y energía eléctrica. Existe ínfima relación inversa estadísticamente a un nivel de confianza del 95% y 99% entre la humedad ambiental y voltaje, corriente, potencia, densidad de potencia, energía eléctrica, Ochoa, Sosa, & Vázquez (2017), menciona que los cambios de humedad no son un factor que, por sí solo afecten la medida de voltaje en las plantas.

4.2. Capacidad de las celdas de combustibles microbianas por área (W/m2) y el grado de resistencia a las reacciones REDOX del Grafito y Cobre como ánodo (+), del Alambre Galvanizado y Aluminio como cátodo (-), en la rizosfera

Para determinar la densidad de potencia o capacidad de las bioceldas (Dp), se calculó la potencia (P) a partir de los datos promedio de voltaje 0.55 V y 0.174 mA de corriente obtenidos en Cacao, mediante la siguiente ecuación:

$$P = V * I = 0.55V * 0.174mA = 0.0957mW$$

La capacidad de la biocelda fue determinada en base al área que ocupaba la celda, considerando el radio (R) de cada ½ botella, que sería una celda, cuyo diámetro (D) es de 6.5 cm por lo tanto:

Como el diámetro de la botella es de 6.5 cm ó 0.065 m.

$$R = (D/2) = 0.0325\, m$$

Para el cálculo del área se utilizó el valor de π.

$$A = \pi r^2 = \pi * 0.0325^2 = 0.003318\, m^2$$

Resultando el área de una biocelda 0.003318 m^2

La densidad de potencia (D_p) se determinó de la inversa proporcionalidad de la potencia respecto al área de las bioceldas, mediante la siguiente ecuación:

$$D_p = \frac{P}{A} = (mW/m^2)$$

Potencia

La mayor potencia se registró para la planta de Cacao con 0.094 mW, Suelo libre con 0.026 mW, Césped Torourco con 0.023 mW y 0.014 mW para Palma Aceitera respectivamente, con electrodos de Grafito y Alambre Galvanizado y para Cobre y Aluminio con 0.010 mW en Suelo libre, 0.008 mW en Césped Torourco, 0.005 en Cacao y 0.006 mW en Palma Aceitera, esto deriva del producto del voltaje y corriente relacionándolos directamente, de acuerdo a la figura 46.

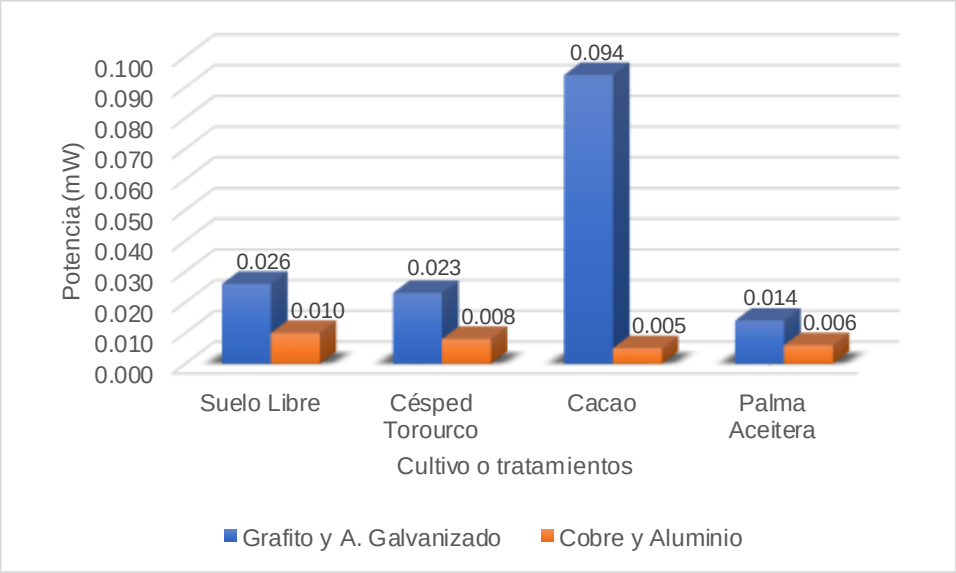


Figura 46. Potencia obtenida en Suelo libre, Césped Torourco, Cacao y Palma Aceitera con dos electrodos diferentes.

La tabla 34, muestra que la prueba estadística de ANOVA (Analysis Of Variance) muestra que existe diferencia significativa de 0.00 entre la varianza de las medias para la potencia, obtenido en Suelo libre, Césped Torourco, Cacao y Palma Aceitera, con electrodos de Grafito y A. Galvanizado, siendo el estrato arbóreo (Cacao) que mayor potencia proporcionó (tabla 35).
Los electrodos de Cobre y Aluminio manifestaron la mayor potencia en suelo libre con 0.010 mW, Césped Torourco con 0.008 mW, seguido por Palma Aceitera con 0.006 mW y Cacao con 0.005 mW, en la tabla 38, la prueba estadística de ANOVA (Analysis Of Variance) muestra que no existe diferencia significativa de 0.60 entre la varianza de las medias para la potencia, obtenido en Suelo libre, Césped Torourco, Cacao y Palma Aceitera, con electrodos de Cobre y Aluminio.

Densidad de potencia

La figura 47 muestra la mayor densidad de potencia fue en Cacao con un valor de 23.30 mW/m^2, seguido por 7.83 mW/m^2, 6.84mW/m^2 y 4.14 mW/m^2 en Suelo libre, Césped Torourco y Palma Aceitera respectivamente para electrodos de Grafito y A. Galvanizado, estando dentro del rango que afirma Debabov (2008), como resultado de los avances de los últimos 10 años, la densidad de potencia de las Celdas de Combustible Microbianas (CCMs) incrementó en diferentes órdenes de magnitud, de 0.1 mW/m^2 a 4.3 W/m^2; los valores reportados para el electrodo de Cobre y Aluminio es de 8.04 mW/m^2 en Suelo libre, 2.37 mW/m^2 en Césped Torourco, 1.48 mW/m^2 en Cacao y 1.67 mW/m^2 en Palma Aceitera, con menor densidad de potencia en Cacao con este último grupo de electrodos; Buitrón & Pérez (2011), reporta 408 mW/m2 con Celdas de Combustile Microbiana para agua residual, por otro lado Alzate, Álvarez, & Sebastián (2008), reportó 640 y 336 mW/m2 empleando agua residual sintética, PLANTPOWER (2011), se propuso mejorar la producción neta de energía eléctrica de la pila de combustible microbiana vegetal de 6.7 mW/m2 a 3.2 mW/m2, siendo eficientes los sistemas para agua residual, por el manejo dela materia prima, en suelo es aún nuevo la forma de este aprovechamiento y complejo con estos sistemas.

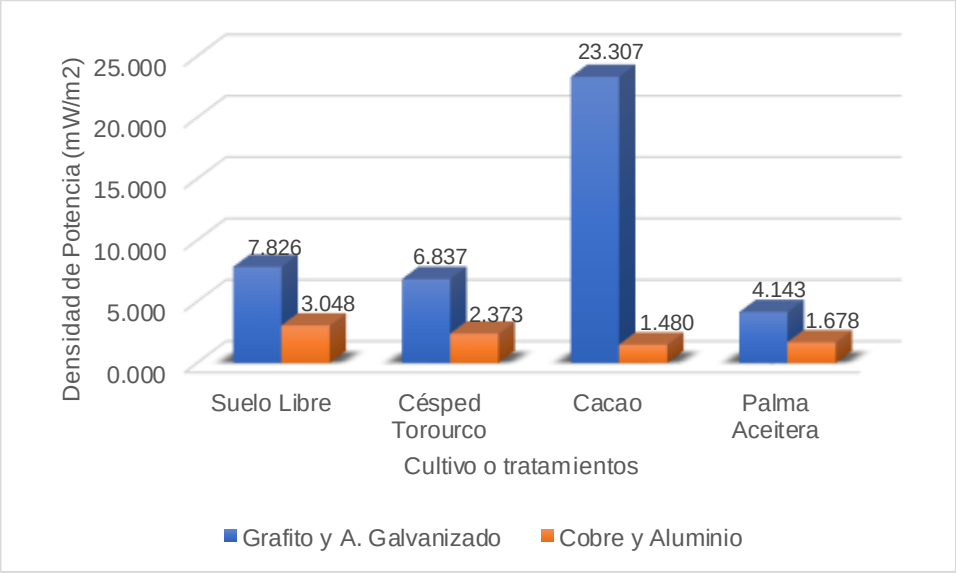


Figura 47. Densidad de corriente obtenido en Suelo libre, Césped Torourco, Cacao y Palma Aceitera con dos electrodos diferentes.

En la tabla 36 y 37 la prueba estadística de ANOVA muestra que existe diferencia significativa de 0.00 entre la varianza de las medias para la densidad de potencia en Suelo libre con 7.82 mW/m^2, Césped Torourco con 6.83 mW/m^2, Cacao con 23.3 mW/m^2 y Palma Aceitera con 4.14 mW/m^2, para electrodos de Grafito y A. Galvanizado, mostrando al estrato arbóreo (Cacao) con mayor densidad de potencia.

La prueba estadística de ANOVA muestra que existe diferencia significativa de 0.028 entre la varianza de las medias para la densidad potencia en Suelo libre con 3.04 mW/m^2, Césped Torourco con 2.37 mW/m^2, Cacao con 1.48 mW/m^2 y Palma Aceitera con 1.67 mW/m^2, con electrodos de Cobre y Aluminio, siendo el testigo donde mayor densidad de potencia se observó (Tabla 39 y 40).

4.3. Costo producción de energía eléctrica con bioceldas para un celular, laptop, casa en zona rural y urbana

La energía eléctrica se calculó a partir de los datos promedio de voltaje 0.51 V y 0.152 mA de corriente, obtenidos del mejor comportamiento en Cacao; Construir un prototipo con bioceldas que abastezca la demanda para un celular tiene un costo de 6,204.47 soles, para una laptop 19,744.85 soles, para una casa en zona rural 15,930.27 soles y 825,914.5 soles para una casa en zona urbana.

Tabla 15.*Costo de producción de energía eléctrica con bioceldas, según la demanda.*

Equipo/casa	Requerimientos			Bioceldas		Resultados		
	Corriente (A)	Voltaje (V)	Bateria (Ah)	Corriente (A)	Voltaje (V)	Área (m2)	Tiempo (h)	Costo (S/.)
Celular	2.703	3.7	4.054	0.169	3.7	14.7	24	6,204.47
Laptop	2.365	14.8	3.547	0.148	14.8	54.6	24	19,744.85
Casa en zona rural	0.127	220	0.191	0.008	220	40	24	15,930.27
Casa en zona urbana	6.023	220	10.328	0.433	220	2480	24	825,914.50

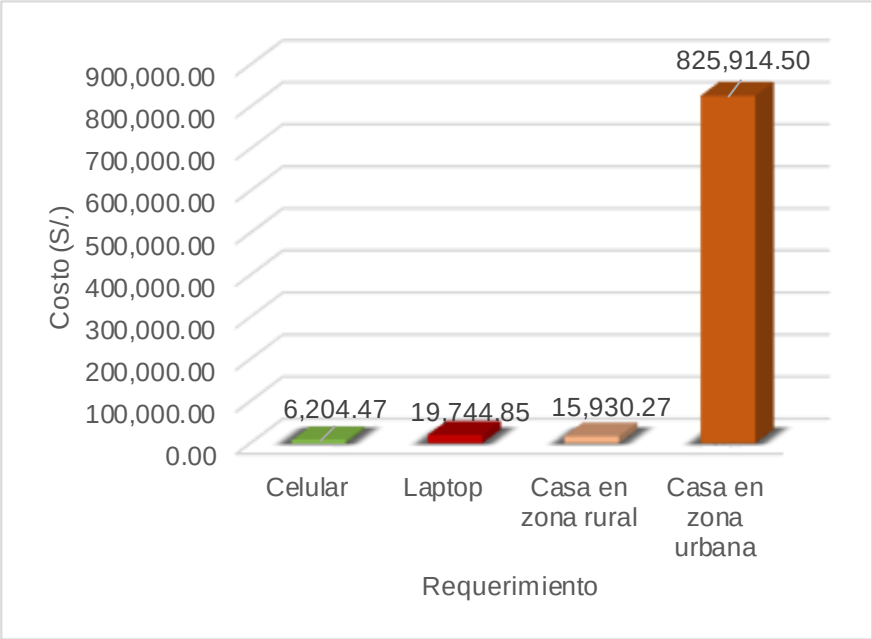


Figura 48. Costos de producción de energía eléctrica con bioceldas, según demanda.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Los electrodos de Grafito y A. Galvanizado manifestaron mayor energía eléctrica en Cacao con un valor de 3.968 mWh y para electrodos de Cobre y Aluminio el mayor valor fue obtenido en el testigo con 0.48 mWh, mostrando diferencias en los valores reportados y definiendo como mejor electrodo a Grafito y Alambre Galvanizado.

1. El mayor voltaje y corriente se reporta en el cultivo de Cacao con 0.547 V y 0.174 mA para electrodos de Grafito y A. Galvanizado; 0.427 V y 0.024 mA para Cobre y Aluminio en Suelo libre, siendo el primer electrodo el que mayor voltaje manifestó, sin embargo, no existe relación entre voltaje y estrato vegetal, pero si en la corriente eléctrica, el horario del día no afecta el valor del voltaje y la corriente, por último el voltaje tiene baja dependencia respecto al tipo de electrodos, y alta para la corriente. Los parámetros físicos, químicos, microbiológicos del suelo y las condiciones atmosféricas tienen influencia en el valor del voltaje y corriente.

2. La mayor potencia y densidad de potencia se presenta en el cultivo de Cacao con 0.094 mW y 23.30 mW/m2 en electrodos de Grafito y Alambre Galvanizado y para Cobre y Aluminio con 0.010 mW y 8.04 mW/m2 en Suelo libre, habiendo mejores resultados para el electro de Grafito y A. Galvanizado.

3. El costo producción de energía eléctrica con bioceldas es alto en comparación con tecnología actual como el panel solar, requiriendo un costo de 6,204.47 soles para un celular y 825,914.50 soles para una casa en zona urbana con bioceldas, esto debido a que la emergente fuente de energía está en sus inicios, rescatando la fuente, siendo residuos a nivel molecular aprovechado como bioenergía, con un alto valor ambiental ya que no genera contaminantes.

5.2. Recomendaciones

1. Ya que el mejor resultado se obtuvo en planta de Cacao, la calidad y condiciones del suelo favorecieron la obtención de mayor energía, por tanto, si se mejora algunas condiciones con carbón vegetal, la obtención de corriente se incrementaría.

2. Garantizar el contacto del área superficial de los electrodos instalados en cada celda perteneciente a cada prueba experimental, de tal manera que la lectura de los parámetros de corriente y voltaje sean los correctos.

3. Esta forma de obtención es una versión 1, que sería mejorada con circuitos electrónicos para optimizar el voltaje en términos de corriente y sumar la investigación a las nuevas fuentes de bioenergía para el desarrollo de la región Ucayali

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AC, A. c. (s.f.). *Alambre Galvanizado.* Huánuco: Aceros comerciales.

Aguilera, S. (2000). Importancia de la protección de la materia orgánica en suelos. *Simposio Proyecto Ley Protección de Suelo, Boletín No. 14. Valdivia*, 77-85.

Álvarez, C. (25 de Junio de 2008). Bacteria que generan electricidad. *El País*, pág. 40.

Álvarez, C. (25 de Junio de 2008). Bacterias que generan electricidad. *Sociedad*, pág. 40.

Alzate, L., Fuentes, C., Álvarez, A., & Sebastian, P. (2008). Generación de electricidad a partir de una celda de combustible microbiana tipo PEM. *INTERCIENCIA*, 33(7): 503-309.

AVS, A. v. (S.F.). *Microorganismos del suelo y biofertilización.* Barcelona, España: Asociación Vida Sana.

Azcón , J., & Talón, B. (2000). *FUNDAMENTOS DE FISIOLOGÍA VEGETAL.* Barcelona: McGRAW-HILL.

Badri, D., & Vivanco, J. (2009). Regulation and function of root exudates. *Plant, cell and environment*, 666-681.

Bais, H., Weir, T., Perry, L., Gilroy, S., & Vivanco, J. (2006). The roles of root exudades in Rhizosphere interactions wiht plants and other organism. *Annu Rev Plant Biol*, 57: 233 -66.

Balocchi, E., Boyssières, L., Martínez, M., Melo, M., Ribot, G., Rodríguez, H., . . . Soto, H. (2002). *Curso de Química General.* Santiago de Chile: Universidad de Santiago de Chiles, Facultad de Química y Biología.

Barber, D., & Martin, J. (1976). The release of organic substances by cereal rootss into soil. *New Phytol*, 76: 69-80.

Barceló, J., Nicolás, G., Sabater, B., & Sánchez, R. (2009). *Fisiología Vegetal.* Madrid: Pirámide.

Barea, J. (1998). Biología de la rizosfera. *Investigación y ciencia*, 74-81.

Bennetto, H. P. (1990). Electricity Generation by Micro-organisms. *Biotechnology Education*, 1(4): 163-168.

Bond, D., & Lovley, D. R. (2003). Electricity production by Geobactersulfurreducens attached to electrodes. *Aplplied and Environmental Microbiology*, 69(3):1548-1555.

Borie, G., Aguilera, S., & Peirano , P. (1999). Actividad biológica en suelos. *Frontera Agrícola*, 29-35.

Browen, G. (1980). *Misconceptions, concepts and approaches in rhizosphere biology. In contemporary Microbial Ecology (D. C. Ellwood, J. N. Hedger, N. J. Latham & J. K, Lynch, Eds).* New York: Academic Press.

Buitrón, G., & Pérez, J. (2011). Producción de electricidad en celdas de combustible microbianas utilizando agua residual: efecto de la distancia entre electrodos. *D.R TIP Revista Especializada en Ciencia Químicas Biológicas*, 12(1):5-11.

Bújovtsev, B., Klimontóvich, Y., & Míákishev, G. (1986). *Física 3.* Moscú: Mir.

Canedo, W. (2005). *DIAGNÓSTICO DEL SECTOR ENERGÉTICO EN EL ÁREA RURAL DE BOLIVIA.* OLADE, ACDI & Universidad de Calgary.

Caraballo, M. Á., & García, J. M. (2017). Energías renovables y desarrollo económico. Un análisis para España y las grandes economías europeas. *El trimestre económico*, vol. LXXXIV(3):551-609.

Carmona, A., Esparza, F., García, J., Solorza, O., & Poggi, H. (2006). *Environmental Biotechnology and Engineering In: H. M. Poggi-Veraldo, C. Garibay-Orijel, F. Esparza-García,E. Ríos-Leal, I. Sastre, H. Macarie (Editores).* México: Environmental Biotechnology and Engineering - 2006 (2ed International Meeting on Environmental Biotechnology and Engineering (21MEBE).

Castro, C. (2015). *Evaluación de la Fenología Reproductiva y Dinámica de Producciónde l Cultivo de Cacao (Theobroma cacao L.) CCN - 51, en el Distrito de Irazola.* Pucallpa: Universidad Nacional Intercultural de la Amazonía.

Cengel, Y., & Boles, M. (2008). *Termodinámica.* México D.F.: Mc Graw Hill.

Censtanza, L., Antolinez, D. M., Bohórquez, J. A., & Corredor, A. M. (2015). Bacterias anaerobias: procesos que realizan y contribuyen a la sostenibilidad de la vida en el planeta. *Nova*, 13(23): 55-81.

Chang, R. (2002). *Química general.* Mexico: McGraw-Hill.

Chaudhuri, S. K., & Lovley, D. R. (2003). Electricity generation by direct oxidation of glucose in mediatorless microbial fuel cells. *Nature Biotechnology* , 21(10):1229-1232.

Choi, Y., Kim, N., Kim, S., & Jung, S. (2003). Dynamic behaviors of redox mediators within the hydrophobic layers as an important factor for effective microbial fuel cell operation. *Bulletin Korean Chemical Society*, 24(4): 437-440.

CN, C. d. (s.f.). *Alambre de aluminio desnudo.* México: Tecnología y confianza.

Constructor eléctrico energy management. (16 de Septiembre de 2015). *Las ventajas del cobre como conductor eléctrico.* Obtenido de Las ventajas del cobre como conductor eléctrico: https://constructorelectrico.com/las-ventajas-del-cobre-como-conductor-electrico/

CRIE, C. R. (2013). *El sector eléctrico en américa central.* Comisión Regional de Interconexión Eléctrica, CRIE.

Cristancho, J., Munévar, F., Acosta, Á., Santacruz, L., & Torres, M. (2007). Relación de las características edáficas y el desarrollo del sistema de raíces e la palma de aceite (Elaeis guineensis Jacq). *PALMAS*, 21-29.

De la Cruz, M., Whitkus, R., Gómez, A., & Mota, L. (1995). Origins of Cacao Cultivation. *Nature*, 375:542-543.

De Juana , J., Santos, F., Crespo, A., Herrera, M., De Francisco, A., & Fernandez, J. (2008). *ENERGÍAS RENOVABLES PARA EL DESARROLLO.* Madrid: Paninfo.

Debabov, V. (2008). Elecitic y from Microorganisms. *Microbiology*, 77(2): 123-131.

DGER, D. G. (2011). *Electrificación rural en el Perú. In: I Foro regional sobre electrificación en el departamento de Ancahs.* Huaraz: DGER.

Díaz, E. (2000). *Génesis, Morfología y Clasificación de algunos suelos de Pucallpa.* Lima: Universidad Nacional Agraria La Molina.

Dostert, N., Roque, J., Cano, A., La Torre, M. I., & Weigend, M. (2012). *Hoja botánica: Cacao.* Lima, Perú: Giacomotti Comunicación Gráfica S.A.C.

Du, Z., Li, H., & Gu, T. (2007). A state of the art review on microbial fuel cells: A promising technology for wastewater treatment and bioenergy. *Biotechnology Advances*, 25(5):464-482.

Fernández, E. (2002). La importancia de lo pequeño. *Comunidades bacterianas y sociedad humana, Política y Sociedad*, 39(3).

Frefuia, S., Rabaey, K., Yuan, Z., & Keller, J. (2008). Syntrophic processes drive the conversión of glucose in microbial fuel cell anodes. *Environ. Sci. Tchnol.*, 42: 7937-7943.

GBD Network. (s.d. de s.m. de s.f.). *Mercado Eléctrico en América Latina: Situación Actual y Perspectivas*. Obtenido de www.prospectiva2020.com / www.gbdnetwork.com

Giraldo, D. (2014). Las especies del género Axonopus (Poaceae: Panicoideae: Paspaleae) de Colombia. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.*, 38(147): 130-176.

Globedia. (27 de Abril de 2012). Moss table, produce electricidad a partir de la fotosíntesis. *Glabedia*, pág. 1.

Gnanamanickam, S. (2007). *Planst - Associated Bacteria.* Netherlands: Springer.

Góngora, A. C., Ochoa, J., Sosa, M. E., & Vázquez, E. (2017). Energía: celdas de combustible microbianas. *redalyc.org*, 21(1): 54-62.

Haberman, W., & Pommer, E. (1991). Biological fuel cells with suphide storage capacity. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 35: 128-133.

Hardy, F. (1961). *Manual del cacao.* Turrialba - Costa rica: Antonio Leheman.

Hartley, C. (1983). *La palma de aceite.* México: Continental.

Hernández, A., Pastor, J., Urcelay, A., & Estalrich, E. (1992). *CAracterísticas radiculares de pastos oligótrofos con Agrostis.* Pamplona: Sociedad Española para el Estudio de los Pastos.

Hodge, A., Paterson, E., Grayston , S., Campbell, C., Ord, B., & Killham, K. (1998). Characterisation and microbial utilisation of exudate material from the rhizosphere of Lolium perenne grown under CO2 enrichment. *Soil. Biol. Biochem*, Vol. 30 N° 8/9 pp. 1033-1043.

Hogan, C. M. (2010). *Bacteria: In: Sidney Draggan (Cleveland, Ed.). Encyclopedia of Earth, National.* Washington DC, USA: Council for Science and the Enviroment.

Hou, B., Hu, Y., & Sun, J. (2012). Performance and microbial diversity of microbial fuel cells coupled woth different cathode type during simultaneous azo dye decolorization and electricity generation. *Bioresourse Technology*, 111:105-110.

Irene, M. (2007). *Química General, unidad X: Electroquímica.* Corrientes: Universidad Nacional del Nordeste, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales y Agrimensura.

Ivers-Tiffee, E., Weber, A., & Herbstritt, D. (2001). Materiales and technologies for SOFC-components. *J. Eur. Soc.*, 21: 1805-1811.

Kaye, B., & Underhill, A. (1989). Studies on polypyrrole films containing redox-active anions. *Synthetic Metals*, 28: 97-102.

Kemble, A., & Macpherson, H. (1954). Liberation of amino acids in perennial rye grass during wilting. *Bioch*, 58: 46-49.

Krull, E., Skjemstad, J., & Baldock, J. (2004). *Functions of Soil Organic Matter and the Effect on Soil Properties.* Barton: Grains Research & Development Corporation report Proyect No CSO 00029.

Lanthier , M., Grogory, K., & Lovley, D. (2008). Growth with high planktonic biomass in Shewanella oneidensis fuel cells. *FEMS Microbiol. Lett.*, 278: 29-35.

Last, F., & Price, D. (1969). *Yeast associate with living plants and their environs. In the Yeasts, vol 1, (eds A. H. Rose and J. S. Harrison).* London: Academic Press.

Li , Y., Zhu, J., Wei, S., Ryu, J., Wang, Q., Sun, L., & Guo, Z. (2011). Poly(propylene) Nanocomposites Containing Various Carbon Nanostructures. *Macromolecular Chemistry and Physics*, 212: 2429-2430.

Logan, B. (2008). *Microbial Fuel Cells.* Ney Jersey: Wiley & Sons.

Logan, B., Hamelers, B., Rozendal, R., Schroder, U., Keller, J., Fregula, S., . . . Rabaey, K. (2006). Microbial fuel cells: methodology and technology. *Enviromental Science and Technology*, 17: 5181-5192.

Mantell, C. (2003). *INGENIERÍA ELECTRO-QUÍMICA.* Sevilla: Reverté.

Marschner, H. (1995). *Mineral Nutrition of Higher Plants.* London: Academic Press.

Marschner, H., & Dell, B. (1994). *Plant and Soil.* Netherlands: Kluwer Academic Publishers.

Martin, J. (1977). Factors influencing the loss of organic carbon from wheat roots. *Soil Biol. Biochem*, 9: 1-17.

Metcalf, & Eddy. (2003). *Wastewater Engineering Treatment and Reuse.* Madrid, España: 4° ed. Mc Graw-Hill. 1485 pp.

Min, B., & Logan, B. (2004). Continuos electricity generation from domestic wastewater and organic substrates in a flat plate microbial fuel cell. *Env. Sci. Technol*, 38:1675-1686.

Moreno, L. (2016). *Simulación de la operación de una Microbial Fuel Cell para aplicación en sistemas aislados de la red.* Sevilla: Universidad de Sevilla, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Dep. Máquinas y Motores Térmicos.

Mortimer, C. (1983). *Química 1ra edición.* México: Iberoamérica.

MUNDO, B. (1 de Septiembre de 2015). El invento chileno para recargar el celular conectándolo a una planta. *Tecnología* , pág. http://www.bbc.com/mundo/noticias/2015/09/150901_tecnologia_recargar_bateria_plantas_chile_egn.

MUNDO, B. (11 de Noviembre de 2015). Las plantas que "dieron luz" a los pobladores de la selva amazónica en Perú. *Tecnología*, pág. http://www.bbc.com/mundo/noticias/2015/11/151109_tecnologia_plantalamparas_energia_electrica_selva_indigenas_luz_peru_amazonas_utec_lb.

Nannipieri, P., Ascher, J., Ceccherini, M., Landi, L., Pietramellara, G., & Renella, G. (2003). Microbial diversity and soil funnctions. *European Journal of Soil Science*, 655-670.

Oliveros , A., Macías, F., Carrera, C., Marín, D., & Molinillo, J. (2009). Exudados de la raíz y su relevancia actual en las interacciones alelopáticas. *Quim. Nova*, 32: 198-213.

Palou, N. (1 de Diciembre de 2015). La radio que funciona con electricidad por plantas de musgo. *Microsiervos*, págs. 1-2.

Pant, D., Bogeart, G., Diels, L., & Vanbroekhoven, K. (2010). A review of the subtrates used in microbial fuel cells (MFCs) for sustaninable energy production. *Bioresource Technology*, 101(6):1533-1543.

Paul, E., & Voroney, R. (1980). *Nutrient and energy flow through soil microbial biomass. In Contemporary Microbial Ecology (eds. D. C. Elwood, J. N. Hedger, M. J. Latham, J. M. Lynch & J. H Slater).* London: Academic Press.

Paul, E., Harris, D., Klug, M., & Ruess, R. (1999). *The Determination of Microbial Biomas. En G. P. Robertson, D. C. Coleman, C. S. Bledsoe, and P. Sollins: Standard soil methods for long-term ecological research.* New York: Oxford University Press.

Pearl, H. &. (24 de abril de 2019). *A mini review of microbial consortia: their role in aquatic production and biogeochemical cycling*. Obtenido de Microbial Ecology [revista en internet]* 1996: http://link.springer.com/article/10.1007/BF00171569#page-1

PLANTPOWER. (28 de Enero de 2011). *CORDIS.* Obtenido de Plantas y bacterias para generar electricidad: http://cordis.europa.eu/result/rcn/86057_es.html

Rabaey, K., & Verstraete, W. (2005). Microbial fuel cells: novel biotechnology for energy generation. *Trend in Biotechnology*, 23(6):291-298.

Rabaey, K., Boon, N., Siciliano, S., Verhaege, M., & Verstraete, W. (2004). Biofuel cells select for microbial consortia that self-mediate electron transfer. *Appl. Environ. Microbiol.*, 70: 5373-5382.

Rabaey, K., Lissens, G., Siciliano, S., & Verstraete, W. (2003). A microbial fuel cell capable of converting glucose to electricity at high rate and efficiency. *Biotechnology Letters*, 25(3):1531-1535.

Revelo, D., Hurtado, N., & Ruiz, J. (2013). Celdas de Combustible Microbianas (CCMs): Un Reto para la Remoción de Materia Orgánica y la Generación de Energía Eléctrica. *Universidad de Nariño*, 24(6):17-28.

Reyes, R., Bastidas, S., & Peña, E. A. (1997). Distribución del sistema radical de la palma de aceite (Elaeis guineensis Jacq.) en Tumaco, Colombia. *Palmas*, 18(3):49-57.

Rillig, M. (2004). Arbuscularmycorrhizae, glomalin, and soil aggregation. *Canadian Journal of Soil Science*, 355-363.

Romero, A., Adrian, J., & Lugo, A. (2012). Bacterias, fuente de energía para el futuro. *Re-creaciones*, 16: 118-143.

Rucks, L., García, F., Kaplán, A., Ponce de León, J., & Hill, M. (2004). *Propiedades Físicas del Suelo .* Montevideo-Uruguay: Universidad de la República, Facultad de Agronomía.

Ruiz, J. (2001). El asombroso reino de los hongos. *Avance y Perspectiva*, 275-281.

Saavedra, I. M. (2012). *Diseo de una Celda de Combustible Microbiológica con Uso de Bacterias de Azufre y Hierro.* Santiago de Chile: Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Química y Biotecnología.

Sagardoy, M., & Mandolesi, M. (2004). *Biología del suelo "Guía de estudio".* Bahía blanca: Editorial de la Universidad Nacional del Sur.

Sauerbeck, D., & Johnen, B. (1977). Root formation and decomposition during plant growth. *In Soil Organic Matter Studies*, 1: 141-148.

Schink, B. (1997). Energetics of syntrophic cooperation in methanogenic degradation. *Microbiology and molecular biology reviews*, 61(2).

Schippers, B., Bakker, A., & Bakker, P. (1987). Interactions of Deleterious and Beneficial Rhizosphere Microorganisms and the Effect of Cropping Practices. *Annual Review of Phytopathology*, 339-358.

Serway, R., & Beichner, R. (2002). *Física para ciencias e ingeniería.* México: McGRAW-HILL.

Serway, R., & Faughn, J. (2001). *Física.* México: Pearson Education.

Silva, R. (2010). *Caracterización de las propiedades físicas de los suelos agrícolas de la Universidad Nacional de Ucayali.* Pucallpa: Universidad Nacional de Ucayali.

Singer, M., & Munns, D. (1996). *Soils: An introduction.* New Jersey: Prentice-Hall.

Sitte, P., Weiler, E., Kadereit, J., Bresinsky, A., & Kömer, C. (2004). *Strasburger Tratado de Botánica.* Barcelona: Omega.

Soracco, E. (2014). *Evolución y tendencias del sector eléctrico a nivel mundial. In: Actualización de la exposición realizada en corriente en el II Congreso Nacional de Ingeniería. VIII Jornadas Regionales de Ingeniería del NEA. 10 y de octubre de 2014.* La Plata: Universidad Nacional de la Plata.

Sylvia, D., Fuhrmann, J., Hartel, P., & Zuberer, D. (2005). *Principles and Applications of Soil Microbiology.* New Jersey: Pearson Education.

Tan, K., & Dowling, P. (1984). Effect of organic matter on CEC due to permanent and variable charges in selected temperate region soils. *ElSEVIER*, 89-101.

Tello, H. (2015). *PERÚ: SECTOR ELÉCTRICO.* Lima: PACIFIC CREDIT RATING.

Usha, R. J., Hema, S. N., & Kanchana, D. D. (2011). Antogonistic activity of actinomycetes isolates against human pathogen. *J Microbial Biotechnol Res.*, 1: 74-79.

Valera, F., Solorza, Q., & Hernández , E. (2010). *CELDAS DE COMBUSTIBLE.* Canada: Académica Española.

Vante, N. (2003). *ELECTROQUÍMICA Y ELECTROCATÁLISIS.* Poitiers: e-libro.net.

Wild, A. (1992). *Condiciones del suelo y desarrollo de las plantas según russell.* Madrid: Mundi-Prensa.

Yupanqui, B., Alcántara , D., Meléndez , A., & Chinchay, C. (2008). *QUÍMICA I.* Lima: Imprenta Grupo IDAT.

ANEXOS

Anexo 1: Tabla de resultados estadísticos

Tabla 16. *Prueba de ANOVA para la energía eléctrica obtenido con Grafito y A. Galvanizado.*

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	16.632	3	5.544	26.086	.000
Dentro de grupos	5.101	24	.213		
Total	21.733	27			

Tabla 17. *Prueba de HSD Tukey de Subconjuntos homogéneos para la energía eléctrica. obtenido con Grafito y A. Galvanizado.*

Tratamiento o cultivo	N	Subconjunto para alfa = 0.05	
		1	2
T3: Palma Aceitera	7	.3286	
T1: Césped Torourco	7	.5457	
T0: Suelo libre	7	.6229	
T2: Cacao	7		2.2614
Sig.		.636	1.000

Tabla 18. *Prueba de ANOVA para la energía eléctrica obtenido con Cobre y Aluminio.*

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	.066	3	.022	3.541	.030
Dentro de grupos	.149	24	.006		
Total	.215	27			

Tabla 19. *Prueba de HSD Tukey de Subconjuntos homogéneos para la energía eléctrica obtenido con Cobre y Aluminio.*

Tratamiento o cultivo	N	Subconjunto para alfa = 0.05	
		1	2
T2: Cacao	7	.1186	
T3: Palma Aceitera	7	.1343	.1343
T1: Césped Torourco	7	.1900	.1900
T0: Suelo libre	7		.2414
Sig.		.347	.078

Tabla 20. *Prueba de T de Student para la energía eléctrica en Suelo libre, Césped Torourco, Cacao y Palma Aceitera con electrodos diferentes, Grafito + A. Galvanizado y Cobre + Aluminio.*

		Prueba de Levene de igualdad de varianzas		prueba t para la igualdad de medias						
		F	Sig.	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Diferencia de error estándar	95% de intervalo de confianza de la diferencia	
									Inferior	Superior
Energía eléctrica en Suelo Libre	Se asumen varianzas iguales	2.882	.115	6.160	12	.000	.38143	.06192	.24652	.51634
	No se asumen varianzas iguales			6.160	10.059	.000	.38143	.06192	.24357	.51928
Energía eléctrica en Césped Torourco	Se asumen varianzas iguales	8.981	.011	3.209	12	.008	.35571	.11084	.11422	.59721
	No se asumen varianzas iguales			3.209	6.508	.016	.35571	.11084	.08956	.62187
Energía eléctrica en Cacao	Se asumen varianzas iguales	12.323	.004	6.504	12	.000	2.14286	.32947	1.42500	2.86071
	No se asumen varianzas iguales			6.504	6.009	.001	2.14286	.32947	1.33697	2.94875
Energía eléctrica en Palma Aceitera	Se asumen varianzas iguales	2.108	.172	10.774	12	.000	.19429	.01803	.15500	.23358
	No se asumen varianzas iguales			10.774	11.266	.000	.19429	.01803	.15471	.23386

Tabla 21. *Prueba de T de Student para el voltaje en Suelo libre, Césped Torourco, Cacao y Palma Aceitera con electrodos diferentes, Grafito + A. Galvanizado y Cobre + Aluminio.*

		Prueba de Levene de igualdad de varianzas		prueba t para la igualdad de medias						
		F	Sig.	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Diferencia de error estándar	95% de intervalo de confianza de la diferencia	
									Inferior	Superior
Voltaje en Suelo libre	Se asumen varianzas iguales	3.162	.101	-2.610	12	.023	-.03286	.01259	-.06029	-.00543
	No se asumen varianzas iguales			-2.610	9.185	.028	-.03286	.01259	-.06125	-.00446
Voltaje en Césped Torourco	Se asumen varianzas iguales	3.791	.075	-.581	12	.572	-.02857	.04920	-.13578	.07864
	No se asumen varianzas iguales			-.581	7.647	.578	-.02857	.04920	-.14295	.08581
Voltaje en Cacao	Se asumen varianzas iguales	3.210	.098	5.326	12	.000	.23143	.04346	.13675	.32611
	No se asumen varianzas iguales			5.326	6.402	.001	.23143	.04346	.12669	.33617
Voltaje en Palma Aceitera	Se asumen varianzas iguales	.775	.396	-.977	12	.348	-.01571	.01608	-.05075	.01932
	No se asumen varianzas iguales			-.977	11.952	.348	-.01571	.01608	-.05076	.01933

Tabla 22. *Prueba de T de Student para el corriente en Suelo libre, Césped Torourco, Cacao y Palma Aceitera con electrodos diferentes, Grafito + A. Galvanizado y Cobre + Aluminio.*

		Prueba de Levene de igualdad de varianzas		prueba t para la igualdad de medias						
		F	Sig.	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Diferencia de error estándar	95% de intervalo de confianza de la diferencia	
									Inferior	Superior
Corriente en Suelo libre	Se asumen varianzas iguales	.602	.453	6.040	12	.000	.04286	.00710	.02740	.05832
	No se asumen varianzas iguales			6.040	11.026	.000	.04286	.00710	.02725	.05847
Corriente en Césped Torourco	Se asumen varianzas iguales	6.000	.031	5.292	12	.000	.04000	.00756	.02353	.05647
	No se asumen varianzas iguales			5.292	7.082	.001	.04000	.00756	.02217	.05783
Corriente en Cacao	Se asumen varianzas iguales	4.207	.063	6.278	12	.000	.15714	.02503	.10261	.21168
	No se asumen varianzas iguales			6.278	6.079	.001	.15714	.02503	.09609	.21820
Corriente en Palma Aceitera	Se asumen varianzas iguales	5.333	.040	9.815	12	.000	.02429	.00247	.01889	.02968
	No se asumen varianzas iguales			9.815	10.800	.000	.02429	.00247	.01883	.02974

Tabla 23. *Prueba de ANOVA para el voltaje en Suelo libre, Césped Torourco, Cacao y Palma Aceitera, con electrodos de Grafito y A. Galvanizado.*

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	.101	3	.034	7.947	.001
Within Groups	.102	24	.004		
Total	.204	27			

Tabla 24. *Prueba de Tukey HSD para voltaje en Suelo libre, Césped Torourco, Cacao y Palma Aceitera, con electrodos de Grafito y A. Galvanizado.*

(I) Tipo de tratamiento		Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
Suelo libre	Césped Torourco	.04571	.03487	.565	-.0505	.1419
	Cacao	-,11286*	.03487	.017	-.2091	-.0167
	Palma Aceitera	.01714	.03487	.960	-.0791	.1133
Césped Torourco	Suelo libre	-.04571	.03487	.565	-.1419	.0505
	Cacao	-,15857*	.03487	.001	-.2548	-.0624
	Palma Aceitera	-.02857	.03487	.845	-.1248	.0676
Cacao	Suelo libre	,11286*	.03487	.017	.0167	.2091
	Césped Torourco	,15857*	.03487	.001	.0624	.2548
	Palma Aceitera	,13000*	.03487	.005	.0338	.2262
Palma Aceitera	Suelo libre	-.01714	.03487	.960	-.1133	.0791
	Césped Torourco	.02857	.03487	.845	-.0676	.1248
	Cacao	-,13000*	.03487	.005	-.2262	-.0338

Tabla 25. *Prueba de ANOVA para la corriente en Suelo libre, Césped Torourco, Cacao y Palma Aceitera, con electrodos de Grafito y A. Galvanizado.*

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	.054	3	.018	101.85	.000
Within Groups	.004	24	.000		
Total	.058	27			

Tabla 26. *Prueba de Tukey HSD para corriente en Suelo libre, Césped Torourco, Cacao y Palma Aceitera, con electrodos de Grafito y A. Galvanizado.*

(I) Tipo de tratamiento		Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
Suelo libre	Césped Torourco	.00643	.00711	.803	-.0132	.0260
	Cacao	-,08643*	.00711	.000	-.1060	-.0668
	Palma Aceitera	,02929*	.00711	.002	.0097	.0489
Césped Torourco	Suelo libre	-.00643	.00711	.803	-.0260	.0132
	Cacao	-,09286*	.00711	.000	-.1125	-.0732
	Palma Aceitera	,02286*	.00711	.018	.0032	.0425
Cacao	Suelo libre	,08643*	.00711	.000	.0668	.1060
	Césped Torourco	,09286*	.00711	.000	.0732	.1125
	Palma Aceitera	,11571*	.00711	.000	.0961	.1353
Palma Aceitera	Suelo libre	-,02929*	.00711	.002	-.0489	-.0097
	Césped Torourco	-,02286*	.00711	.018	-.0425	-.0032
	Cacao	-,11571*	.00711	.000	-.1353	-.0961

Tabla 27. *Prueba de ANOVA para voltaje en Suelo libre, Césped Torourco, Cacao y Palma Aceitera, con electrodos de Cobre y Aluminio.*

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	.000	3	.000	2.400	.093
Within Groups	.001	24	.000		
Total	.002	27			

Tabla 28. *Prueba de ANOVA para la corriente en Suelo libre, Césped Torourco, Cacao y Palma Aceitera, con electrodos de Cobre y Aluminio.*

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	.000	3	.000	2.400	.093
Within Groups	.001	24	.000		
Total	.002	27			

Tabla 29. *Análisis correlacional de spearman de las variables.*

Rho de Spearman		Voltaje (V)	Corriente (mA)	Potencia (mW)	Densidad de potencia (mW/m2)	Energía eléctrica (mWh)
Estrato vegetativo (arboreo, arbustivo y herbáceo)	Coeficiente de correlación	-.058	-,142**	-,151**	-,151**	-,151**
	Sig. (bilateral)	.287	.009	.006	.006	.006
	N	336	336	336	336	336
Horario de medida (mañana y tarde)	Coeficiente de correlación	-.030	.028	.020	.020	.020
	Sig. (bilateral)	.580	.615	.718	.718	.718
	N	336	336	336	336	336
Electrodos (Grafito y Galvanizado, Cobre y Aluminio)	Coeficiente de correlación	-,197**	-,805**	-,728**	-,728**	-,728**
	Sig. (bilateral)	.000	.000	.000	.000	.000
	N	336	336	336	336	336
Textura del suelo (Franco)	Coeficiente de correlación					
	Sig. (bilateral)					
	N	336	336	336	336	336

Tabla 30. *Análisis correlacional de pearson de parámetros físicos del suelo.*

R de Pearson		Voltaje (V)	Corriente (mA)	Potencia (mW)	Densidad de potencia (mW/m2)	Energía eléctrica (mWh)
Densidad aparente del suelo (g/cm3)	Correlación de Pearson	.[b]	.[b]	.[b]	.[b]	.[b]
	Sig. (bilateral)					
	N	336	336	336	336	336
Temperatura del suelo (°C)	Correlación de Pearson	,140**	.002	-.003	-.003	-.003
	Sig. (bilateral)	.010	.975	.955	.955	.955
	N	336	336	336	336	336
Capacidad de campo (%)	Correlación de Pearson	-.029	-,245**	-,306**	-,306**	-,306**
	Sig. (bilateral)	.593	.000	.000	.000	.000
	N	336	336	336	336	336
Punto de marchitéz (%)	Correlación de Pearson	,111*	.080	.043	.043	.043
	Sig. (bilateral)	.041	.143	.432	.432	.432
	N	336	336	336	336	336

**. La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).

*. La correlación es significativa en el nivel 0,05 (bilateral).

b. No se puede calcular porque, como mínimo, una de las variables es constante.

Tabla 31. *Análisis correlacional de pearson de parámetros químicos del suelo.*

R de Pearson		Voltaje (V)	Corriente (mA)	Potencia (mW)	Densidad de potencia (mW/m2)	Energía eléctrica (mWh)
Conductividad eléctrica (mS/cm)	Correlación de Pearson	,176**	,446**	,478**	,478**	,478**
	Sig. (bilateral)	.001	.000	.000	.000	.000
	N	336	336	336	336	336
pH	Correlación de Pearson	-.067	,254**	,294**	,294**	,294**
	Sig. (bilateral)	.219	.000	.000	.000	.000
	N	336	336	336	336	336
Materia orgánica (%)	Correlación de Pearson	,111*	,464**	,498**	,498**	,498**
	Sig. (bilateral)	.042	.000	.000	.000	.000
	N	336	336	336	336	336
Nitrógeno (%)	Correlación de Pearson	.054	.017	.022	.022	.022
	Sig. (bilateral)	.328	.756	.689	.689	.689
	N	336	336	336	336	336
Fósforo (ppm)	Correlación de Pearson	-.068	,270**	,305**	,305**	,305**

	Sig. (bilateral)	.211	.000	.000	.000	.000
	N	336	336	336	336	336
Potasio (ppm)	Correlación de Pearson	.005	,381**	,421**	,421**	,421**
	Sig. (bilateral)	.921	.000	.000	.000	.000
	N	336	336	336	336	336
Cadmio (ppm)	Correlación de Pearson	,151**	,420**	,472**	,472**	,472**
	Sig. (bilateral)	.006	.000	.000	.000	.000
	N	336	336	336	336	336
Calcio (Cmol(+)/Kg)	Correlación de Pearson	.038	,413**	,457**	,457**	,457**
	Sig. (bilateral)	.489	.000	.000	.000	.000
	N	336	336	336	336	336
Magnesio (Cmol(+)/Kg)	Correlación de Pearson	.085	,437**	,485**	,485**	,485**
	Sig. (bilateral)	.122	.000	.000	.000	.000
	N	336	336	336	336	336
Aluminio (Cmol(+)/Kg)	Correlación de Pearson	,107*	-.106	-,147**	-,147**	-,147**
	Sig. (bilateral)	.049	.052	.007	.007	.007
	N	336	336	336	336	336

Hidrógeno (Cmol(+)/Kg)	Correlación de Pearson	,168**	.003	-.019	-.019	-.019
	Sig. (bilateral)	.002	.960	.723	.723	.723
	N	336	336	336	336	336
CIC efectiva (meq/100g)	Correlación de Pearson	,145**	.020	-.012	-.012	-.012
	Sig. (bilateral)	.008	.719	.825	.825	.825
	N	336	336	336	336	336
Bases cambiables (%)	Correlación de Pearson	-.086	,196**	,237**	,237**	,237**
	Sig. (bilateral)	.115	.000	.000	.000	.000
	N	336	336	336	336	336
Ácidos cambiables (%)	Correlación de Pearson	.084	-,207**	-,247**	-,247**	-,247**
	Sig. (bilateral)	.122	.000	.000	.000	.000
	N	336	336	336	336	336
Saturación de aluminio (%)	Correlación de Pearson	.079	-,207**	-,250**	-,250**	-,250**
	Sig. (bilateral)	.151	.000	.000	.000	.000
	N	336	336	336	336	336

**. La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).

*. La correlación es significativa en el nivel 0,05 (bilateral).

Tabla 32. *Análisis correlacional de pearson de parámetros microbiológicos del suelo.*

R de Pearson		Voltaje (V)	Corriente (mA)	Potencia (mW)	Densidad de potencia (mW/m2)	Energía eléctrica (mWh)
Enumeración de bacterias heterotróficas aerobias (UFC/g)	Correlación de Pearson	.090	,362**	,359**	,359**	,359**
	Sig. (bilateral)	.098	.000	.000	.000	.000
	N	336	336	336	336	336
Enumeración de bacterias heterotróficas anaerobias (UFC/g)	Correlación de Pearson	,129*	,465**	,505**	,505**	,505**
	Sig. (bilateral)	.018	.000	.000	.000	.000
	N	336	336	336	336	336
Enumeración de Actinomicetos (UFC/g)	Correlación de Pearson	-.101	,187**	,223**	,223**	,223**
	Sig. (bilateral)	.065	.001	.000	.000	.000
	N	336	336	336	336	336
Enumeración de Fungi (Mohos y Levaduras) (UFC/g)	Correlación de Pearson	,114*	,388**	,446**	,446**	,446**
	Sig. (bilateral)	.037	.000	.000	.000	.000
	N	336	336	336	336	336
Enumeración de Lactobacillus	Correlación de Pearson	.b	.b	.b	.b	.b

	Sig. (bilateral)					
	N	336	336	336	336	336
Micorrizas (Presencia micelial/g)	Correlación de Pearson	.[b]	.[b]	.[b]	.[b]	.[b]
	Sig. (bilateral)					
	N	336	336	336	336	336

**. La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).

*. La correlación es significativa en el nivel 0,05 (bilateral).

b. No se puede calcular porque, como mínimo, una de las variables es constante.

Tabla 33. *Análisis correlacional de pearson de los parámetros atmosféricos.*

R de Pearson		Voltaje (V)	Corriente (mA)	Potencia (mW)	Densidad de potencia (mW/m2)	Energía eléctrica (mWh)
Temperatura ambiental (°C)	Correlación de Pearson	,157**	,185**	,217**	,217**	,217**
	Sig. (bilateral)	.004	.001	.000	.000	.000
	N	336	336	336	336	336
Precipitación (mm)	Correlación de Pearson	-.006	.033	.018	.018	.018
	Sig. (bilateral)	.906	.545	.746	.746	.746
	N	336	336	336	336	336
Heliofonía (Hora sol)	Correlación de Pearson	-.038	-.103	-.093	-.093	-.093
	Sig. (bilateral)	.486	.058	.087	.087	.087
	N	336	336	336	336	336
Humedad ambiental (%)	Correlación de Pearson	-,133*	-,190**	-,180**	-,180**	-,180**
	Sig. (bilateral)	.015	.000	.001	.001	.001
	N	336	336	336	336	336

**. La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).

*. La correlación es significativa en el nivel 0,05 (bilateral).

Tabla 34. *Prueba de ANOVA para la potencia en Suelo libre, Césped Torourco, Cacao y Palma Aceitera, con electrodos de Grafito y A. Galvanizado.*

	Sum of Squares	Df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	.017	3	.006	102.213	.000
Within Groups	.001	24	.000		
Total	.019	27			

Tabla 35. *Prueba de Tukey HSD para la de potencia en Suelo libre, Césped Torourco, Cacao y Palma Aceitera, con electrodos de Grafito y A. Galvanizado.*

(I) Tipo de tratamiento		Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
Suelo libre	Césped Torourco	.002857	.004013	.891	-.00821	.01393
	Cacao	-,051571*	.004013	.000	-.06264	-.04050
	Palma Aceitera	,011857*	.004013	.033	.00079	.02293
Césped Torourco	Suelo libre	-.002857	.004013	.891	-.01393	.00821
	Cacao	-,054429*	.004013	.000	-.06550	-.04336
	Palma Aceitera	.009000	.004013	.140	-.00207	.02007
Cacao	Suelo libre	,051571*	.004013	.000	.04050	.06264
	Césped Torourco	,054429*	.004013	.000	.04336	.06550
	Palma Aceitera	,063429*	.004013	.000	.05236	.07450
Palma Aceitera	Suelo libre	-,011857*	.004013	.033	-.02293	-.00079
	Césped Torourco	-.009000	.004013	.140	-.02007	.00207
	Cacao	-,063429*	.004013	.000	-.07450	-.05236

Tabla 36. *Prueba de ANOVA para la densidad de potencia en Suelo libre, Césped Torourco, Cacao y Palma Aceitera, con electrodos de Grafito y A. Galvanizado.*

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	1525.172	3	508.391	148.819	.000
Within Groups	81.988	24	3.416		
Total	1607.160	27			

Tabla 37. *Prueba de Tukey HSD para la densidad de potencia en Suelo libre, Césped Torourco, Cacao y Palma Aceitera, con electrodos de Grafito y A. Galvanizado.*

(I) Tipo de tratamiento		Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
Suelo libre	Césped Torourco	-.07414	.98795	1.000	-2.7995	2.6512
	Cacao	-15,47657*	.98795	.000	-18.2019	-12.7512
	Palma Aceitera	3,68286*	.98795	.005	.9575	6.4082
Césped Torourco	Suelo libre	.07414	.98795	1.000	-2.6512	2.7995
	Cacao	-15,40243*	.98795	.000	-18.1278	-12.6771
	Palma Aceitera	3,75700*	.98795	.004	1.0316	6.4824
Cacao	Suelo libre	15,47657*	.98795	.000	12.7512	18.2019
	Césped Torourco	15,40243*	.98795	.000	12.6771	18.1278
	Palma Aceitera	19,15943*	.98795	.000	16.4341	21.8848
Palma Aceitera	Suelo libre	-3,68286*	.98795	.005	-6.4082	-.9575
	Césped Torourco	-3,75700*	.98795	.004	-6.4824	-1.0316
	Cacao	-19,15943*	.98795	.000	-21.8848	-16.4341

Tabla 38. *Prueba de ANOVA para la potencia en Suelo libre, Césped Torourco, Cacao y Palma Aceitera, con electrodos de Cobre y Aluminio.*

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	.001	3	.000	2.789	.062
Within Groups	.002	24	.000		
Total	.003	27			

Tabla 39. *Prueba de ANOVA para la densidad de potencia en Suelo libre, Césped Torourco, Cacao y Palma Aceitera, con electrodos de Cobre y Aluminio.*

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	10.698	3	3.566	3.600	.028
Within Groups	23.777	24	.991		
Total	34.475	27			

Tabla 40. *Prueba de Tukey HSD para la densidad de potencia en Suelo libre, Césped Torourco, Cacao y Palma Aceitera, con electrodos de Cobre y Aluminio.*

(I) Tipo de tratamiento		Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
Suelo libre	Césped Torourco	.67489	.53203	.591	-.7928	2.1426
	Cacao	1,56819*	.53203	.033	.1005	3.0359
	Palma Aceitera	1.37034	.53203	.073	-.0973	2.8380
Césped Torourco	Suelo libre	-.67489	.53203	.591	-2.1426	.7928
	Cacao	.89330	.53203	.356	-.5744	2.3610
	Palma Aceitera	.69546	.53203	.567	-.7722	2.1631
Cacao	Suelo libre	-1,56819*	.53203	.033	-3.0359	-.1005
	Césped Torourco	-.89330	.53203	.356	-2.3610	.5744
	Palma Aceitera	-.19784	.53203	.982	-1.6655	1.2698
Palma Aceitera	Suelo libre	-1.37034	.53203	.073	-2.8380	.0973
	Césped Torourco	-.69546	.53203	.567	-2.1631	.7722
	Cacao	.19784	.53203	.982	-1.2698	1.6655

Anexo 2: Promedios de parámetros eléctricos en tres estratos y un testigo con electrodos de Cobre y Aluminio

Tabla 41. *Promedio de Voltaje (V) de 7 días con electrodos de Cobre y Aluminio.*

N°	DÍA	Suelo Libre (V)	Césped Torourco (V)	Cacao (V)	Palma Aceitera (V)
1	1	0.42	0.43	0.31	0.43
2	2	0.42	0.41	0.33	0.43
3	3	0.42	0.41	0.33	0.42
4	4	0.41	0.30	0.32	0.37
5	5	0.43	0.39	0.34	0.36
6	6	0.45	0.37	0.30	0.37
7	7	0.45	0.34	0.28	0.38
Promedio		0.43	0.38	0.31	0.39

Tabla 42. *Promedio de corriente (mA) de 7 días con electrodos de Cobre y Aluminio.*

N°	DÍA	Suelo Libre (mA)	Césped Torourco (mA)	Cacao (mA)	Palma Aceitera (mA)
1	1	0.048	0.022	0.014	0.016
2	2	0.040	0.024	0.015	0.018
3	3	0.019	0.027	0.019	0.017
4	4	0.016	0.021	0.017	0.013
5	5	0.013	0.020	0.017	0.010
6	6	0.014	0.016	0.014	0.012
7	7	0.016	0.014	0.013	0.012
Promedio		0.024	0.021	0.016	0.014

Tabla 43. *Promedio de potencia de 7 días con electrodos de Cobre y Aluminio.*

N°	DÍA	Suelo Libre (mW)	Césped Torourco (mW)	Cacao (mW)	Palma Aceitera (mW)
1	1	0.0202	0.0095	0.0044	0.0067
2	2	0.0168	0.0100	0.0050	0.0077
3	3	0.0080	0.0111	0.0063	0.0073
4	4	0.0065	0.0063	0.0054	0.0046
5	5	0.0056	0.0078	0.0056	0.0038
6	6	0.0064	0.0058	0.0042	0.0044
7	7	0.0073	0.0046	0.0035	0.0045
Promedio		0.010	0.008	0.005	0.006

Tabla 44. *Promedio de densidad de potencia de 7 días con electrodos de Cobre y Aluminio.*

N°	DÍA	Suelo Libre (mW/m2)	Césped Torourco (mW/2)	Cacao (mW/m2)	Palma Aceitera (mW/m2)
1	1	6.0781	2.8599	1.3200	2.0178
2	2	5.0683	3.0193	1.5017	2.3056
3	3	2.4221	3.3420	1.9132	2.1992
4	4	1.9713	1.9115	1.6284	1.3932
5	5	1.6746	2.3550	1.6981	1.1356
6	6	1.9161	1.7443	1.2527	1.3342
7	7	2.2064	1.3807	1.0455	1.3589
Promedio		3.05	2.37	1.48	1.68

Tabla 45. *Promedio de energía eléctrica de 7 días con electrodos de Cobre y Aluminio.*

N°	DÍA	Suelo Libre (mWh)	Césped Torourco (mWh)	Cacao (mWh)	Palma Aceitera (mWh)
1	1	0.484	0.228	0.105	0.161
2	2	0.404	0.240	0.120	0.184
3	3	0.193	0.266	0.152	0.175
4	4	0.157	0.152	0.130	0.111
5	5	0.133	0.188	0.135	0.090
6	6	0.153	0.139	0.100	0.106
7	7	0.176	0.110	0.083	0.108
Promedio		0.24	0.19	0.12	0.13

Anexo 3: Promedios de parámetros eléctricos en tres estratos y un testigo con electrodos de Grafito y Alambre Galvanizado

Tabla 46. *Promedio de voltaje de 7 días con electrodos de Grafito y A. Galvanizado.*

N°	DÍA	Suelo Libre (V)	Césped Torourco (V)	Cacao (V)	Palma Aceitera (V)
1	1	0.39	0.40	0.54	0.43
2	2	0.37	0.29	0.53	0.40
3	3	0.35	0.11	0.51	0.34
4	4	0.39	0.33	0.51	0.38
5	5	0.42	0.42	0.49	0.37
6	6	0.42	0.44	0.50	0.37
7	7	0.43	0.46	0.48	0.36
Promedio		0.40	0.35	0.51	0.38

Tabla 47. *Promedio de corriente de 7 días con electrodos de Grafito y A. Galvanizado.*

N°	DÍA	Suelo Libre (mA)	Césped Torourco (mA)	Cacao (mA)	Palma Aceitera (mA)
1	1	0.046	0.060	0.133	0.037
2	2	0.077	0.044	0.151	0.037
3	3	0.079	0.026	0.172	0.038
4	4	0.067	0.059	0.172	0.038
5	5	0.065	0.068	0.150	0.034
6	6	0.062	0.079	0.147	0.035
7	7	0.063	0.078	0.139	0.035
Promedio		0.07	0.06	0.15	0.04

Tabla 48. *Promedio de potencia de 7 días con electrodos de Grafito y A. Galvanizado.*

N°	DÍA	Suelo Libre (mW)	Césped Torourco (mW)	Cacao (mW)	Palma Aceitera (mW)
1	1	0.018	0.024	0.071	0.016
2	2	0.028	0.013	0.080	0.015
3	3	0.028	0.003	0.088	0.013
4	4	0.026	0.020	0.088	0.014
5	5	0.027	0.029	0.074	0.013
6	6	0.026	0.035	0.073	0.013
7	7	0.027	0.036	0.067	0.013
Promedio		0.03	0.02	0.08	0.01

Tabla 49. *Promedio de densidad de potencia de 7 días con electrodos de Grafito y A. Galvanizado.*

N°	DÍA	Suelo Libre (mW/m2)	Césped Torourco (mW/m2)	Cacao (mW/m2)	Palma Aceitera (mw/m2)
1	1	5.387	7.276	21.533	4.803
2	2	8.584	3.838	24.030	4.444
3	3	8.460	0.827	26.456	3.881
4	4	7.974	5.939	26.624	4.307
5	5	8.256	8.610	22.216	3.796
6	6	7.943	10.583	22.046	3.934
7	7	8.179	10.786	20.214	3.838
Promedio		7.83	6.84	23.30	4.14

Tabla 50. *Promedio de energía eléctrica de 7 días con electrodos de Grafito y A. Galvanizado.*

N°	DÍA	Suelo Libre (mWh)	Césped Torourco (mWh)	Cacao (mWh)	Palma Aceitera (mWh)
1	1	0.429	0.579	1.715	0.382
2	2	0.684	0.306	1.914	0.354
3	3	0.674	0.066	2.107	0.309
4	4	0.635	0.473	2.120	0.343
5	5	0.657	0.686	1.769	0.302
6	6	0.633	0.843	1.756	0.313
7	7	0.651	0.859	1.610	0.306
Promedio		0.62	0.54	1.86	0.33

Anexo 4: Cálculo de demanda de energía y costo con bioceldas

Cálculo del costo de cargar un celular con bioceldas

La corriente requerida para un celular es de 2.703 A, de acuerdo a la ecuación:

$$I = \frac{P}{V} = \frac{10W}{3.7\,V} = 2.703A$$

La corriente para la batería es de 4.054Ah, consideran el 50% más, como se muestra,

$$I_b = 0.5(2.703A) + 2.703A = 4.054Ah$$

La corriente con la capacidad que debería de tener las bioceldas es de 0.169 A, considerando que el sistema aprovecha y capta los electrones durante las 24 horas del día,

$$I_r = \frac{4.054Ah}{24h} = 0.169A$$

Para generar 3.7 V se requieren 7 subbioceldas en serie y 971 veces en paralelo para alcanzar una corriente de 0.169 A, haciendo un total de 6531 celdas ó 33 bandejas germinadoras.

$$B = 7 * 971 = 6531\ subbioceldas$$

$$N_b = \frac{6531\ subbioceldas}{200\ subbioceldas * bandeja} = 33\ bandejas\ germinadoras$$

La cantidad de cable a requerir es de calibre 16 es de 375 m, considerando a realizar enlaces en paralelo o serie se requiere 5 cm de cable, por lo tanto,

$$L_c = \frac{(5cm * (7-1) * 971) + (5cm * 2 * 971)}{100cm} = 375m$$

La cantidad de electrodos de Grafito y Alambre Galvanizado es de 6531 respectivamente,

Teniendo en cuenta las 7 celdas en serie se tiene un ancho de 0.3 m y 49 m de longitud para las 971 en paralelo, por lo tanto, el área requerida para un celular es de 16 m2,

$$A = 0.3m * 49m = 16m^2$$

Y el costo para cargar un celular con bioceldas es de S/. 6,204.47

Cálculo del costo de cargar una laptop con bioceldas

La corriente requerida para una laptop es de 2.365 A, de acuerdo a la ecuación:

$$I = \frac{P}{V} = \frac{35W}{14.8\,V} = 2.365A$$

La corriente para la batería es de 3.547Ah, consideran el 50% más, como se muestra,

$$I_b = 0.5(2.365A) + 2.365A = 3.547Ah$$

La corriente con la capacidad que debería de tener las bioceldas es de 0.148 A, considerando que el sistema aprovecha y capta los electrones durante las 24 horas del día,

$$I_r = \frac{3.547Ah}{24h} = 0.148A$$

Para generar 14.8 V se requieren 27 subbioceldas en serie y 849 veces en paralelo para alcanzar una corriente de 0.148 A, haciendo un total de 22858 subbioceldas ó 114 bandejas germinadoras.

$$B = 27 * 849 = 22858\ subbioceldas$$

$$N_b = \frac{22858\ subbioceldas}{200\ subbioceldas * bandeja} = 114\ bandejas\ germinadoras$$

La cantidad de cable a requerir es de calibre 16 es de 1185 m, considerando a realizar enlaces en paralelo o serie se requiere 5 cm de cable, por lo tanto,

$$L_c = \frac{(5cm * (27-1) * 849) + (5cm * 2 * 849)}{100cm} = 114m$$

La cantidad de electrodos de Grafito y Alambre Galvanizado es de 22858 respectivamente,

Teniendo en cuenta las 27 celdas en serie se tiene un ancho de 1.3 m y 42 m de longitud para las 849 en paralelo, por lo tanto, el área requerida para un celular es de 57 m2,

$$A = 1.3m * 42m = 57m^2$$

Y el costo para cargar un celular con bioceldas es de S/. 19,744.85.

Cálculo del costo de cargar una casa en zona rural con bioceldas

La corriente requerida para una casa en zona rural es de 0.127 A, de acuerdo a la ecuación:

$$I = \frac{P}{V} = \frac{28W}{220\,V} = 0.127A$$

La corriente para la batería es de 0.191Ah, consideran el 50% más, como se muestra,

$$I_b = 0.5(0.127A) + 0.127A = 0.191Ah$$

La corriente con la capacidad que debería de tener las bioceldas es de 0.008 A, considerando que el sistema aprovecha y capta los electrones durante las 24 horas del día,

$$I_r = \frac{0.191Ah}{24h} = 0.008A$$

Para generar 220 V se requieren 400 subbioceldas en serie y 46 veces en paralelo para alcanzar una corriente de 0.008 A, haciendo un total de 18286 subbioceldas ó 91 bandejas germinadoras.

$$B = 46 * 400 = 18286\ subbioceldas$$

$$N_b = \frac{18286\ subbioceldas}{200\ subbioceldas * bandeja} = 91\ bandejas\ germinadoras$$

La cantidad de cable a requerir es de calibre 16 es de 917 m, considerando a realizar enlaces en paralelo o serie se requiere 5 cm de cable, por lo tanto,

$$L_c = \frac{(5cm * (400 - 1) * 46) + (5cm * 2 * 46)}{100cm} = 917m$$

La cantidad de electrodos de Grafito y Alambre Galvanizado es de 18286 respectivamente,

Teniendo en cuenta las 400 celdas en serie se tiene un ancho de 20 m y 2 m de longitud para las 46 en paralelo, por lo tanto, el área requerida para un celular es de 46 m2,

$$A = 20m * 2m = 46m^2$$

Y el costo para cargar un celular con bioceldas es de S/. 15,930.27.

Cálculo del costo de cargar una casa en zona urbana con bioceldas

La corriente requerida para una casa en zona rural es de 6.023 A, de acuerdo a la ecuación:

$$I = \frac{P}{V} = \frac{1523W}{220\,V} = 6.023A$$

La corriente para la batería es de 10.384Ah, consideran el 50% más, como se muestra,

$$I_b = 0.5(0.6.023A) + 6.023A = 10.3284Ah$$

La corriente con la capacidad que debería de tener las bioceldas es de 0.433 A, considerando que el sistema aprovecha y capta los electrones durante las 24 horas del día,

$$I_r = \frac{10.328Ah}{24h} = 0.433A$$

Para generar 220 V se requieren 400 subbioceldas en serie y 2487 veces en paralelo para alcanzar una corriente de 0.433 A, haciendo un total de 994645 subbioceldas ó 4973 bandejas germinadoras.

$$B = 400 * 2487 = 994645\ subbioceldas$$

$$N_b = \frac{994645\ subbioceldas}{200\ subbioceldas * bandeja} = 4973\ bandejas\ germinadoras$$

La cantidad de cable a requerir es de calibre 16 es de 49857 m, considerando a realizar enlaces en paralelo o serie se requiere 5 cm de cable, por lo tanto,

$$L_c = \frac{(5cm * (400 - 1) * 2487) + (5cm * 2 * 2487)}{100cm} = 49857m$$

La cantidad de electrodos de Grafito y Alambre Galvanizado es de 994645 respectivamente,

Teniendo en cuenta las 400 celdas en serie se tiene un ancho de 20 m y 124 m de longitud para las 46 en paralelo, el área requerida para un celular es de 46 m2,

$$A = 20m * 124m = 994645m^2$$

Y el costo para cargar un celular con bioceldas es de S/. 825,914.50.

Anexo 5: Panel fotográfico



Figura 49. Instalación de electrodos.



Figura 50. Bioceldas instaladas.



Figura 51. Recolección de voltaje y corriente en Palma A.



Figura 52. Recolección de voltaje y corriente en Césped Torourco.



Figura 53. Recolección de voltaje y corriente en Cacao.



Figura 54. Recolección de voltaje y corriente en Suelo libre.