

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Facultad de Ciencias Agropecuarias

Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental

EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DEL USO DE ALMIDÓN DE CÁSCARA
DE PLÁTANO (*Musa paradisiaca*) EN LA GENERACIÓN DE ENERGÍA
ELÉCTRICA EN BIOCELDAS GALVÁNICAS, TACNA

TESIS

Presentada por:

Bach. Mary Luz Apaza Zamata

Para optar por el Título Profesional de:

INGENIERO AMBIENTAL

TACNA - PERÚ
2026

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Facultad de Ciencias Agropecuarias

Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental

TESIS

**EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DEL USO DE ALMIDÓN DE
CÁSCARA DE PLÁTANO (*Musa paradisiaca*) EN LA
GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN
BIOCELDAS GALVÁNICAS, TACNA**

SUSTENTADA Y APROBADA EL 29 DE DICIEMBRE DEL 2025, SIENDO
EL JURADO CALIFICADOR:

PRESIDENTE:

.....
Dr. Freddy Walter Delgado Cabrera

SECRETARIO:

.....
Dr. Edgar Chaparro Aguilar

VOCAL:

.....
Dr. Williams Sergio Almanza Quispe

ASESOR:

.....
Dr. Williams Sergio Almanza Quispe

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, Dr. Williams Sergio Almanza Quispe, en mi condición de asesor acreditado por la Resolución de Facultad N°8067-2023-FCAG de la tesis titulada: "EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DEL USO DE ALMIDÓN DE CÁSCARA DE PLÁTANO (*Musa paradisiaca*) EN LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN BIOCELDAS GALVÁNICAS, TACNA". Presentado por el Bachiller Mary Luz Apaza Zamata, para optar el Título Profesional de Ingeniero Ambiental, habiendo cumplido con lo establecido en el reglamento de originalidad y de similitud de trabajo de investigación y producción intelectual considerando que, según la revisión, evaluación y análisis realizado a través del software de similitud textual Turnitin cuenta con el nivel de similitud permitido cuyo porcentaje es del 8 %. Por lo que, CERTIFICO LA SIMILARIDAD de la tesis enunciada líneas arriba, la cual está expedita para continuar con los trámites para la obtención de título profesional, según corresponda consiguiendo la publicación en el repositorio institucional.

FIRMA ASESOR

Nombres y Apellido
DNI

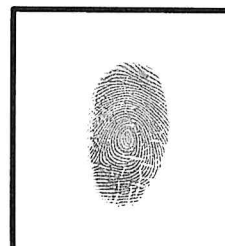

Williams Sergio Almanza Quispe
44369780



FIRMA TESISTA

Nombres y Apellidos
DNI


Mary Luz Apaza Zamata
70999026



DEDICATORIA

A Dios, por haberme dado la sabiduría y la fortaleza para que pueda alcanzar mi sueño, por ser mi fuerza en todo momento y brindarme una vida llena de experiencias.

A mis jurados y asesor, por sus palabras de aliento, su constante apoyo y el tiempo dedicado para orientar y acompañar el desarrollo y culminación de mi tesis.

A mi madre, Rosa Zamata Vilca, por su esfuerzo y su inmenso sacrificio, por ser el principal motor que me impulsa a salir adelante.

A mis hermanos, en especial a Eva, por estar siempre a mi lado, por ser mi compañera de juegos y por su incondicional apoyo.

AGRADECIMIENTO

A Dios por permitirme ser parte de este mundo, disfrutar del privilegio de la vida, y por hacerme entender que a pesar de las adversidades siempre existe un nuevo día para volver a empezar.

A mi asesor quien, gracias a su respaldo, su experiencia, profesionalismo, críticas y recomendaciones, supieron guiar de la mejor manera la elaboración y desarrollo de mi investigación.

A toda la familia de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, a mis docentes, por impartir los conocimientos necesarios para mi crecimiento profesional, por compartir su experiencia personal y profesional a lo largo de mi vida universitaria

CONTENIDO

	Pág.
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
CERTIFICADO DE SIMILITUD	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
CONTENIDO	vi
ÍNDICE DE TABLAS	xii
ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
ÍNDICE DE ANEXOS	xiv
RESUMEN	xv
ABSTRACT	xvi
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	
1.1 Planteamiento del problema	8
1.2 Formulación del problema	12
1.2.1 Formulación del problema general	12
1.2.2 Formulación de los problemas específicos	12
1.3 Delimitación de la investigación	12

	Pág.
1.3.1 Delimitación temporal.....	12
1.3.2 Delimitación espacial.....	13
1.3.3 Delimitación teórica	13
1.4 Justificación de la investigación.....	14
1.4.1 Justificación social	14
1.4.2 Justificación económica	15
1.4.3 Justificación ambiental	16
1.5 Limitaciones	18
CAPÍTULO II: OBJETIVOS E HIPÓTESIS	
2.1 Objetivos	19
2.1.1 Objetivo general	19
2.1.2 Objetivos específicos.....	19
2.2 Hipótesis	19
2.2.2 Hipótesis General	19
2.2.3 Hipótesis Específicas.....	20
2.3 Variables	20
2.3.1 Variable independiente.....	20
2.3.2 Variable dependiente	21
2.3.3 Operacionalización de las variables	21

CAPÍTULO III: MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

3.1	Antecedentes bibliográficos.....	22
3.1.1	Antecedentes Internacionales	22
3.1.2	Antecedentes nacionales.....	25
3.2	Bases teóricas	30
3.2.1	Plátano	30
3.2.1.1	Aprovechamiento del residuo.....	32
3.2.2	Almidón	34
3.2.2.1	Propiedades fisicoquímicas.....	36
3.2.2.2	Aplicaciones y relevancia para la bioelectroquímica	40
3.2.3	Biocelda galvánica	41
3.2.3.1	Características y aplicaciones	45
3.2.3.2	Factores de influyen.....	48
3.3	Definición de términos	49
3.3.1	Cáscara de plátano	49
3.3.2	Catalizador	49
3.3.3	Densidad de corriente	49
3.3.4	Densidad de potencia.....	50
3.3.5	Corriente eléctrica	50
3.3.6	Potencia eléctrica	50

	Pág.
3.3.7 Ánodo	50
3.3.8 Cátodo	51
3.3.9 Electrolito	51
3.3.10 Capacidad electrolítica	51
CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	
4.1 Tipo y diseño de investigación	52
4.1.1 Tipo de investigación.....	52
4.1.2 Nivel de investigación.....	52
4.1.3 Diseño de la investigación	52
4.2 Población y muestra	53
4.2.1 Población	53
4.2.2 Muestra	54
4.2.3 Muestreo	54
4.3 Técnicas aplicadas en la recolección de la información.....	54
4.3.1 Análisis de las características fisicoquímicas de la cáscara de plátano (Musa paradisiaca) y su contenido de almidón	56
4.3.2 Determinación de la dosis y las condiciones operativas óptimas del sistema de biocelda galvánica para la generación de energía eléctrica a partir de almidón de cáscara de plátano (Musa paradisiaca)	57

	Pág.
4.3.3 Evaluación del desempeño eléctrico de una biocelda galvánica en función de la energía generada y del tiempo de operación empleando el almidón de cáscara de plátano (<i>Musa paradisiaca</i>)	61
4.4 Materiales y equipos.....	62
4.4.1 Materiales	62
4.4.2 Equipos	63
4.4.3 Reactivo	63
4.5 Análisis estadístico	63
CAPÍTULO V: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	
5.1 Resultados	65
5.1.1 Características fisicoquímicas de la cáscara de plátano (<i>Musa paradisiaca</i>) y su contenido de almidón	65
5.1.2 Determinación de la dosis y las condiciones operativas óptimas del sistema de biocelda galvánica para la generación de energía eléctrica a partir de almidón de cáscara de plátano (<i>Musa paradisiaca</i>)	67
5.1.3 Evaluación del desempeño eléctrico de una biocelda galvánica en función de la energía generada y del tiempo de operación empleando el almidón de	

cáscara de plátano (<i>Musa paradisiaca</i>)	76
5.2 Discusión de resultados	82
5.2.1 Análisis de las características fisicoquímicas de la cáscara de plátano (<i>Musa paradisiaca</i>) y su contenido de almidón	82
5.2.2 Determinación de la dosis y las condiciones operativas óptimas del sistema de biocelda galvánica para la generación de energía eléctrica a partir de almidón de cáscara de plátano (<i>Musa paradisiaca</i>).....	85
5.2.3 Evaluación del desempeño eléctrico de una biocelda galvánica en función de la energía generada y del tiempo de operación empleando el almidón de cáscara de plátano (<i>Musa paradisiaca</i>)	90
CONCLUSIONES	95
RECOMENDACIONES.....	98
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	100
ANEXOS.....	119

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Operacionalización de las variables	21
Tabla 2. Niveles de parámetros de control	53
Tabla 3. Características fisicoquímicas de la cáscara de plátano y el almidón	66
Tabla 4. ANOVA factorial para voltaje máximo	68
Tabla 5. Medias de los factores para voltaje máximo	69
Tabla 6. Tukey y medias por tratamiento para voltaje máximo	70
Tabla 7. ANOVA factorial para densidad de corriente	70
Tabla 8. Medias de los factores para densidad de corriente.....	71
Tabla 9. Tukey y medias por tratamiento para densidad de corriente	72
Tabla 10. ANOVA factorial para tiempo	73
Tabla 11. Medias de los factores para tiempo	73
Tabla 12. Interacción significativa Dosis × Catalizador para tiempo	74
Tabla 13. Interacción significativa Catalizador × Oxigenación para tiempo	74
Tabla 14. Tukey y medias por tratamiento para tiempo	75
Tabla 15. Parámetros de desempeño eléctrico de la biocelda galvánica durante 24 h de operación continua bajo el tratamiento óptimo T8	81

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Esquema de una celda electroquímica	44
Figura 2. Etapas del procedimiento experimental	55
Figura 3. Esquema de montaje del sistema de celdas biogalvánicas	58
Figura 4. Voltaje en función del tiempo durante 24 h – T8.....	77
Figura 5. Densidad de corriente en función del tiempo durante 24 h – T8.....	78
Figura 6. Potencia instantánea en función del tiempo durante 24 h – T8.....	79
Figura 7. Energía acumulada en función del tiempo durante 24 h – T8.....	80

ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1. Matriz de consistencia	119
Anexo 2. Panel fotográfico	120
Anexo 3. Tabla de datos registrados por tratamiento	123
Anexo 4. Tabla de datos registrados por tratamiento en función al promedio registrado por hora	124

RESUMEN

El aprovechamiento de residuos orgánicos como insumos para sistemas electroquímicos representa una alternativa de interés para la valorización de biomasa residual. En este contexto, la investigación tuvo como objetivo evaluar el uso del almidón de cáscara de plátano (*Musa paradisiaca*) en bioceldas galvánicas para la generación de energía eléctrica. La metodología comprendió la caracterización fisicoquímica de la cáscara y del almidón extraído, seguida de la evaluación experimental de un diseño factorial $2 \times 2 \times 2$ completamente al azar, con dos dosis de almidón (10 y 20 g/L), presencia o ausencia de carbón activado y condición de oxigenación del cátodo, con tres repeticiones por tratamiento. Posteriormente, el tratamiento óptimo fue monitoreado durante 24 horas continuas de operación. Los resultados mostraron que la cáscara presentó $7,1 \pm 1,4$ % de almidón en base húmeda, equivalente a 32,9 % en base seca. El tratamiento óptimo fue T8 (20 g/L, con catalizador y con oxigenación), que alcanzó un voltaje máximo promedio de $0,4230 \pm 0,0072$ V, una densidad de corriente de $1,3503 \pm 0,0183$ mA/cm² y el menor tiempo para alcanzar el máximo voltaje ($1,60 \pm 0,85$ min). Durante 24 h, este tratamiento generó 564,45 mWh de energía total, con voltaje promedio de 0,3804 V. Se concluye que el almidón de cáscara de plátano es viable como material de aprovechamiento experimental en bioceldas galvánicas de baja potencia.

Palabras clave: almidón de cáscara de plátano, biocelda galvánica, energía eléctrica, valorización de residuos orgánicos, desempeño electroquímico.

ABSTRACT

The use of organic residues as inputs for electrochemical systems represents a promising alternative for the valorization of residual biomass. In this context, the objective of this research was to evaluate the use of banana peel starch (*Musa paradisiaca*) in galvanic biocells for electrical energy generation. The methodology included the physicochemical characterization of the peel and the extracted starch, followed by the experimental evaluation of a completely randomized $2 \times 2 \times 2$ factorial design, with two starch doses (10 and 20 g/L), presence or absence of activated carbon, and cathode oxygenation condition, with three replicates per treatment. Subsequently, the optimal treatment was monitored for 24 continuous hours of operation. The results showed that the peel contained $7,1 \pm 1,4\%$ starch on a wet basis, equivalent to 32,9% on a dry basis. The optimal treatment was T8 (20 g/L, with catalyst and with oxygenation), which reached an average maximum voltage of $0,4230 \pm 0,0072$ V, a current density of $1,3503 \pm 0,0183$ mA/cm², and the shortest time to reach maximum voltage ($1,60 \pm 0,85$ min). During 24 h, this treatment generated a total energy output of 564,45 mWh, with an average voltage of 0,3804 V. It is concluded that banana peel starch is a viable material for experimental use in low-power galvanic biocells.

Keywords: banana peel starch, galvanic biocell, electrical energy, organic waste valorization, electrochemical performance.

INTRODUCCIÓN

La comunidad científica internacional advierte que el uso intensivo de combustibles fósiles es el principal impulsor del cambio climático actual. De hecho, los combustibles fósiles han dominado el suministro energético mundial durante décadas, representando alrededor del 80% de la matriz energética global. Esta dependencia ha llevado a niveles récord de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), contribuyendo al calentamiento global y sus impactos asociados. El Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) enfatiza la urgencia de limitar el consumo de carbón, petróleo y gas natural para poder reducir las emisiones casi a la mitad hacia 2030. En paralelo, el aumento poblacional y el crecimiento económico han disparado la demanda mundial de energía, ejerciendo más presión sobre recursos fósiles finitos y exacerbando la crisis climática.

A la par del problema energético, la gestión inadecuada de residuos orgánicos se ha convertido en una preocupación ambiental de alcance global. Los desechos orgánicos (restos de alimentos, residuos agrícolas, etc.) constituyen una fracción sustancial de la basura mundial, en regiones como América Latina alcanzan en promedio el 50 % de los residuos

urbanos, y con frecuencia terminan en vertederos sin tratamiento adecuado. Esta situación genera emisiones significativas de GEI, particularmente metano (CH_4), un gas con poder calorífico elevado que se libera por la descomposición anaerobia de la materia orgánica. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) estima que la pérdida y desperdicio de alimentos (un componente mayoritario de los residuos orgánicos) es responsable de entre un 8 % y 10 % de las emisiones globales de GEI. Asimismo, el Banco Mundial reporta que en 2016 la disposición y tratamiento de residuos sólidos generaron aproximadamente 1600 millones de toneladas de CO_2 equivalente, cerca del 5% de las emisiones antropogénicas de ese año. Estos datos evidencian que el manejo actual de los residuos orgánicos no solo representa un desperdicio de recursos potencialmente útiles, sino que agrava la problemática climática global.

Diversos organismos internacionales subrayan que los residuos deben ser reconsiderados como recursos valiosos en lugar de desechos. La falta de tratamiento específico de los residuos orgánicos no solo provoca emisiones evitables de metano y lixiviados contaminantes, sino que también impide el aprovechamiento energético de esta biomasa. Por el contrario, su valorización mediante tecnologías limpias permitiría generar

energía renovable al mismo tiempo que se mitigan las emisiones.

El crecimiento sostenido de la demanda eléctrica, la electrificación de usos finales y la presión por descarbonizar la matriz energética han intensificado la búsqueda de tecnologías complementarias de generación con menor huella ambiental. En 2024, la demanda global de electricidad aumentó 4,3% respecto de 2023, reflejando una aceleración asociada a mayor consumo en edificios, digitalización y cambios tecnológicos (IEA, 2025). En paralelo, los impactos climáticos y sanitarios vinculados a la gestión inadecuada de residuos orgánicos refuerzan el interés por rutas de valorización que articulen el enfoque de economía circular con soluciones energéticas de baja escala y costos accesibles.

En el contexto peruano y regional, la valorización de residuos orgánicos municipales se ha reforzado desde instrumentos de gestión pública orientados a metas de recuperación. De este modo, lineamientos de reporte y cumplimiento para municipalidades se han establecido umbrales mínimos de valorización de residuos sólidos orgánicos municipales en periodos de evaluación (MINAM, 2023). En Tacna, la Política Ambiental Regional al 2030 reconoce explícitamente la problemática de la inadecuada disposición final de residuos sólidos

municipales, indicando una alta proporción de descarga en botaderos y la necesidad de impulsar la valorización bajo enfoques de economía circular (Gobierno Regional de Tacna [GORE], 2023). Dentro de este marco, los residuos orgánicos de mercados y hogares (incluyendo cáscaras y subproductos agroalimentarios) constituyen una corriente disponible y potencialmente valorizable para alternativas tecnológicas de bajo costo y aplicación experimental.

Entre los residuos orgánicos de alta disponibilidad se encuentra la biomasa asociada al plátano/banano (género Musa), cuyo volumen global es elevado. La FAO estima que en 2021 se produjeron más de 125 millones de toneladas de bananos, además de 45,3 millones de toneladas de plátanos y bananos de cocción, lo que evidencia la magnitud de la cadena productiva y, por extensión, de sus subproductos (FAO, 2023). Diversos estudios reportan que la cáscara representa aproximadamente del 35 % al 40 % del peso del fruto, por lo que su generación como residuo doméstico e industrial es significativa (Zou et al., 2022; Yasin et al., 2025). La disposición inadecuada de este residuo puede contribuir a impactos locales (olores, atracción de vectores, lixiviados) y a emisiones por degradación anaerobia en disposición final, lo que refuerza la pertinencia de rutas de aprovechamiento.

Desde la perspectiva fisicoquímica, la cáscara de plátano constituye una matriz rica en polisacáridos y compuestos funcionales; particularmente, puede contener fracciones apreciables de almidón, cuya magnitud depende de variedad y estado de madurez. En estudios comparativos de almidones aislados de pulpa y cáscara de banano verde se ha reportado un contenido de almidón rangos referenciales entre 16 % hasta el 48,5 % en base seca según reportes previos y condiciones de maduración (Li et al., 2018, Hadisoewignyo et al., 2017).

Como alternativa tecnológica, las bioceldas han sido descritas como dispositivos capaces de generar corriente mediante la oxidación catalítica de materia orgánica en el ánodo y la transferencia de electrones hacia un circuito externo, combinando potencialmente recuperación de energía con degradación de sustratos (Revelo et al., 2013; Logan, 2006). En paralelo, desde el enfoque de materiales, se reconoce que electrolitos poliméricos de origen orgánico pueden alcanzar conductividades iónicas relevantes para dispositivos electroquímicos; por ejemplo, se han reportado valores de conductividad iónica a temperatura ambiente de 10^{-3} S/cm en electrolitos orgánicos optimizados a partir de celulosa, pectina, látex y almidón, lo que respalda el fundamento de emplear biopolímeros como medios de transporte iónico (Rayung et al., 2020). Ello, en función a su matriz que

aporta grupos funcionales (hidroxilos, carboxilos) y una fase polisacarídica que favorece interacciones con sales y agua, aspectos directamente relacionados con el transporte iónico cuando se evalúa su uso como componente electrolítico (Ohiduzzaman et al., 2024).

De tal manera, la presente investigación se centró en evaluar el uso del almidón extraído de la cáscara de plátano (*Musa paradisiaca*) como componente del sistema electrolítico en una biocelda galvánica para la generación de energía eléctrica, bajo condiciones controladas de laboratorio, teniendo como propósito principal el evaluar el desempeño eléctrico del sistema en función de la energía generada y del tiempo de operación, la determinación de una dosis óptima de almidón.

La estructura de esta investigación se organiza en cinco capítulos. El Capítulo I presenta el planteamiento del problema, que abarca la descripción, formulación, justificación, importancia, alcances y limitaciones del estudio. El Capítulo II expone los objetivos, las hipótesis y las variables de investigación. El Capítulo III desarrolla los antecedentes, las bases teóricas y la definición de términos clave. El Capítulo IV describe el marco metodológico, incluyendo el tipo y diseño de investigación, población y muestra, técnicas e instrumentos de recolección, así como el

procesamiento y análisis de datos. Finalmente, el Capítulo V muestra los resultados obtenidos, la discusión con base en estudios previos. Seguidamente se presentan las conclusiones, recomendaciones, referencias bibliográficas y anexos.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

1.1 Planteamiento del problema

En el Perú se ha experimentado un crecimiento de la demanda energética que históricamente se ha cubierto con hidrocarburos. Si bien el país cuenta con una importante generación hidroeléctrica, aún cerca del 41% de su electricidad proviene de fuentes fósiles –principalmente gas natural (39 %), mientras el 59 % restante es de fuentes de bajo carbono (mayormente hidroeléctrica). Esta participación de combustibles fósiles en el sector eléctrico implica emisiones significativas de CO₂ y una exposición a la volatilidad de recursos no renovables. De hecho, estudios nacionales alertan que las reservas de gas natural (Camisea) podrían agotarse en unas 2 a 3 décadas al ritmo de explotación actual. La dependencia energética de un recurso con horizonte finito de 22 años subraya la urgencia de diversificar la matriz hacia fuentes sostenibles.

Por otro lado, la gestión de residuos sólidos en el Perú enfrenta importantes deficiencias, especialmente en el manejo de la fracción orgánica. Según el Ministerio del Ambiente (MINAM), la disposición inadecuada de los residuos sólidos disminuye la calidad de vida y

contribuye al aumento de GEI en el país. Se estima que a nivel nacional se generan miles de toneladas diarias de residuos orgánicos, provenientes de restos domésticos, agrícolas e industriales. No obstante, la valorización energética de estos residuos es mínima. Datos recientes indican que en 2021 solo se aprovechó energéticamente en torno al 1,8% de la totalidad de residuos orgánicos generados, lo que implica que más del 98% de esta biomasa terminó desperdiciada o en vertederos. Consecuentemente, grandes volúmenes de materia orgánica se descomponen sin control, liberando metano a la atmósfera.

El inventario nacional de GEI reportó que los residuos sólidos liberan aproximadamente 285 mil toneladas de metano al año en el Perú, gas que tiene un potencial de calentamiento global, 28 veces mayor que el CO₂ a 100 años. Estos indicadores evidencian que el país no está capitalizando el recurso energético contenido en sus desechos orgánicos, a pesar de los impactos ambientales negativos de la situación actual.

Frente a esta doble problemática, la valorización energética de la biomasa residual surge como una estrategia clave. La cual consiste en aprovechar el contenido energético de residuos biodegradables (restos de alimentos, residuos agroindustriales como los de plátano, etc.) para

producir electricidad, calor u otros combustibles renovables. Existen múltiples vías tecnológicas para la valorización energética de residuos orgánicos. Las más consolidadas a nivel mundial incluyen la digestión anaerobia para producción de biogás y la incineración controlada con recuperación de energía (Waste-to-Energy) (Carrasco & Benites, 2017).

Otra línea de desarrollo, de naturaleza más emergente, son las conocidas como celdas galvánicas o bioceldas, la cual se ha convertido en un área prometedora. Algunas bioceldas utilizan microorganismos para oxidar sustratos (pilas de combustible microbianas), mientras que otras usan propiedades electroquímicas de materiales vegetales para funcionar como electrolitos en celdas galvánicas.

Entre los residuos agroindustriales de mayor interés se encuentran los provenientes del banano. El banano (*Musa spp.*) es uno de los frutos más consumidos del mundo; se estima que cerca del 60 % de la biomasa de banano cosechada se desecha como subproducto, generando aproximadamente 114,08 millones de toneladas de residuos a nivel mundial. La cáscara representa la mayor parte de estos desechos y contiene celulosa, hemicelulosa, lignina y almidón. Los contenidos de almidón y azúcares varían según la especie y el grado de madurez: las

cáscaras de plátano verde pueden contener hasta 40 % de almidón, las cáscaras de banana verde alrededor del 15 %, mientras que las cáscaras de banana madura poseen hasta 30 % de azúcares libres. Análisis proximales reportan que la cáscara de banana madura está compuesta aproximadamente por 3,5 al 6,3 % de almidón, 47 al 53 % de fibra dietética y entre 60 y 76 % de carbohidratos totales; también contiene proteínas (5,5 al 9 %), grasa (2 al 11 %) y minerales como potasio, calcio y magnesio. Además de su alto contenido de carbohidratos, presenta antioxidantes naturales que mejoran las propiedades funcionales de biopolímeros.

Aunque la producción de plátano en Tacna no alcanza el volumen de regiones como Piura o Junín, la región participa en la cadena de distribución a través de mercados y transporte. Tacna se ubica en la ruta de exportación hacia Chile y Bolivia, por lo que se consume plátano en cantidades significativas y se genera un volumen apreciable de cáscaras en mercados y hogares.

Por ende, en la investigación, nace la propuesta de estudiar el efecto del uso del almidón proveniente de la cáscara de plátano como precursor en la generación de energía a través de bioceldas.

1.2 Formulación del problema

1.2.1 Formulación del problema general

¿El uso del almidón de cáscara de plátano (*Musa paradisiaca*) en bioceldas galvánicas influye en la generación de energía eléctrica?

1.2.2 Formulación de los problemas específicos

¿Cuáles son las características fisicoquímicas de la cáscara de cáscara de plátano (*Musa paradisiaca*) y su contenido de almidón?

¿Qué dosis y condiciones operativas son las más adecuadas en el sistema de biocelda galvánica para la generación de energía eléctrica a partir de almidón de cáscara de plátano (*Musa paradisiaca*)?

¿Cuál es el desempeño eléctrico de una biocelda galvánica en función de la energía generada y del tiempo de operación empleando el almidón de cáscara de plátano (*Musa paradisiaca*)?

1.3 Delimitación de la investigación

1.3.1 Delimitación temporal

La presente investigación se desarrolló durante el año 2025. La recolección de la materia prima se efectuó entre los meses de mayo y julio, mientras que la fase experimental comprendió los meses de agosto y setiembre donde se efectuaron las experimentaciones para la obtención de

resultados.

1.3.2 Delimitación espacial

La investigación se desarrolló en la región Tacna, provincia de Tacna. La recolección de la materia prima se realizó en el mercado mayorista Miguel Grau, ubicado en el distrito de Tacna, mientras que las pruebas experimentales y el montaje del sistema de biocelda galvánica se llevaron a cabo en un ambiente acondicionado en el distrito Alto de la Alianza.

1.3.3 Delimitación teórica

Teóricamente, la investigación se delimitó al estudio del aprovechamiento del almidón extraído de la cáscara de plátano (*Musa paradisiaca*) como componente del sistema electrolítico en bioceldas galvánicas. El análisis se centró en las características fisicoquímicas de la materia prima y del almidón obtenido, en la influencia de la dosis de almidón y de las condiciones operativas del sistema, y en la evaluación de parámetros eléctricos como voltaje, densidad de corriente, potencia y energía generada. El estudio se enmarcó en principios de valorización de residuos orgánicos, electroquímica aplicada y generación experimental de energía de baja escala.

1.4 Justificación de la investigación

1.4.1 Justificación social

La transición energética no es solo una cuestión ambiental, sino también un desafío social. Más de 675 millones de personas en el mundo aún carecen de acceso a electricidad confiable (ONU, 2024). Esta brecha limita el desarrollo social, la educación, el acceso a la información y la calidad de vida en comunidades vulnerables. En América Latina, aunque el acceso ha mejorado, todavía existen poblaciones rurales que dependen de soluciones costosas y contaminantes como diésel o kerosene. En Perú, aproximadamente el 25 % de los hogares rurales presenta dificultades de acceso a servicios energéticos modernos.

Es importante precisar que la tecnología evaluada en esta investigación no está actualmente en condiciones de sustituir sistemas convencionales de electrificación. Los valores reportados en otros estudios para sistemas similares oscilan en el rango de microvatios a milivatios (Jayasinghe et al., 2014), lo que restringe su aplicación a dispositivos de muy bajo consumo. Por ello, la relevancia social del estudio no radica en una implementación inmediata a gran escala, sino en su potencial formativo y científico.

La generación de datos experimentales locales permite fortalecer capacidades de investigación en bioelectroquímica en el contexto peruano, aportar información en tecnologías emergentes, contribuir a la cultura de aprovechamiento sostenible de residuos.

De tal manera, la exploración de tecnologías descentralizadas y de bajo costo puede, en etapas futuras de desarrollo tecnológico, integrarse a soluciones híbridas en comunidades aisladas.

1.4.2 Justificación económica

Desde el punto de vista económico, el plátano constituye un cultivo relevante para el Perú. En 2023, la producción de plátano superó las 500 mil toneladas (Ministerio de Agricultura [MIDAGRI], 2023), mientras que el país exportó más de 140 millones de dólares en plátano fresco (Observatory of Economic Complexity, 2023). La fracción correspondiente a cáscara carece de valor comercial significativo y generalmente se destina a residuos.

La valorización de subproductos agrícolas forma parte de las estrategias de bioeconomía promovidas internacionalmente (International Renewable Energy Agency, 2020). Sin embargo, la mayoría de los desarrollos tecnológicos asociados a residuos de plátano se orientan a

biogás, bioplásticos o alimentación animal. La aplicación en sistemas electroquímicos aún es limitada y se encuentra en fase experimental.

En este sentido, la investigación no pretende demostrar viabilidad económica inmediata ni establecer modelos de negocio. Su aporte económico es indirecto y se centra en generar conocimiento técnico que permita evaluar, en etapas posteriores, la posibilidad de optimizar sistemas bioelectroquímicos, identificar parámetros operativos (concentración de almidón, pH, estabilidad temporal) que influyen en la generación de voltaje y corriente; así como también, establecer una línea base experimental para investigaciones futuras más avanzadas.

El desarrollo científico es un requisito previo para cualquier evaluación económica sólida. Sin datos experimentales confiables sobre desempeño eléctrico, no es posible realizar análisis de factibilidad. Por tanto, esta investigación constituyó un paso preliminar necesario dentro de una cadena de desarrollo tecnológico más amplia.

1.4.3 Justificación ambiental

La problemática energética mundial continúa estrechamente vinculada al uso predominante de combustibles fósiles. El sector energía

es responsable de aproximadamente el 73 % de las emisiones globales de gases de efecto invernadero (World Resources Institute, 2024), lo que convierte a la transición energética en un eje central de las políticas climáticas internacionales. Aunque la generación renovable ha aumentado sostenidamente, representando más del 30 % de la electricidad mundial en 2023 (Ember, 2025), la demanda energética continúa creciendo, particularmente en países en desarrollo. Este escenario exige no solo ampliar tecnologías consolidadas (solar, eólica), sino también explorar alternativas complementarias de baja escala basadas en recursos locales.

En este escenario, la valorización energética de residuos orgánicos adquiere relevancia. La producción mundial de plátano supera los 125 millones de toneladas anuales, lo que lo convierte en el cuarto cultivo más importante del planeta (FAO, 2023). Diversos estudios estiman que aproximadamente el 60 % de la biomasa del plátano corresponde a residuos agrícolas (hojas, pseudotallo, cáscara), generando más de 100 millones de toneladas de subproductos al año (Sulaiman & Seswoya, 2021). La cáscara representa cerca del 30 al 40 % del peso del fruto (Padam et al., 2014), y cuando es dispuesta en vertederos contribuye a emisiones de metano producto de su degradación anaerobia.

Desde el enfoque ambiental, la presente investigación generó evidencia experimental sobre el comportamiento electroquímico del almidón extraído de cáscara de plátano en bioceldas galvánicas, un campo en investigación actual.

1.5 Limitaciones

La investigación se limitó al estudio experimental del almidón extraído de cáscara de plátano (*Musa paradisiaca*) obtenida de una fuente local específica, por lo que las características fisicoquímicas evaluadas pueden variar respecto de otras procedencias, variedades o estados de madurez del fruto. Asimismo, el sistema ensayado correspondió a bioceldas galvánicas con electrodos de zinc y cobre y condiciones operativas definidas por el diseño experimental, por lo que los resultados no deben extrapolarse de manera directa a otros arreglos electroquímicos o a escalas mayores. El estudio no incluyó evaluación microbiológica ni procesos mediados por microorganismos, de modo que los fenómenos analizados correspondieron exclusivamente al comportamiento electroquímico del sistema. Finalmente, la evaluación del desempeño eléctrico se realizó durante tiempos de operación establecidos experimentalmente, por lo que no se abordó la estabilidad del sistema en periodos prolongados ni su aplicación a nivel piloto o industrial.

CAPÍTULO II

OBJETIVOS E HIPÓTESIS

2.1 Objetivos

2.1.1 Objetivo general

Evaluar el uso del almidón de cáscara de plátano (*Musa paradisiaca*) en bioceldas galvánicas para la generación de energía eléctrica.

2.1.2 Objetivos específicos

Analizar las características fisicoquímicas de la cáscara de plátano (*Musa paradisiaca*) y su contenido de almidón.

Determinar la dosis y las condiciones operativas óptimas del sistema de biocelda galvánica para la generación de energía eléctrica a partir de almidón de cáscara de plátano (*Musa paradisiaca*).

Evaluar el desempeño eléctrico de una biocelda galvánica en función de la energía generada y del tiempo de operación empleando el almidón de cáscara de plátano (*Musa paradisiaca*).

2.2 Hipótesis

2.2.2 Hipótesis General

El uso del almidón de cáscara de plátano (*Musa paradisiaca*) influye

en la generación de energía eléctrica en un sistema de bioceldas galvánicas.

2.2.3 Hipótesis Específicas

Las características fisicoquímicas de la cáscara de plátano (*Musa paradisiaca*) y su contenido de almidón permiten conocer su potencial de aprovechamiento.

La dosis y las condiciones operativas del sistema de biocelda galvánica influyen en la generación de energía eléctrica a partir de almidón de cáscara de plátano (*Musa paradisiaca*).

El desempeño eléctrico de la biocelda galvánica en función de la energía generada y del tiempo de operación es significativo al emplear el almidón de cáscara de plátano (*Musa paradisiaca*).

2.3 Variables

2.3.1 Variable independiente

Las variables independientes se establecieron como:

- X₁: Dosis del almidón de cáscara de plátano
- X₂: Condición operativa de oxigenación
- X₃: Condición operativa de catalizador (carbón activado)

2.3.2 Variable dependiente

Las variables dependientes se establecieron como:

- Y₁: Generación de electricidad

2.3.3 Operacionalización de las variables

En la Tabla 1 se especifican las variables de estudio, incluyendo sus dimensiones e indicadores correspondientes, que fueron empleados en el marco metodológico de la investigación.

Tabla 1

Operacionalización de las variables

Variables	Dimensiones	Indicadores
Variable independiente		
Dosis del almidón	Física	Cantidad (%)
Condiciones operativas	Física	Oxigenación
		Presencia de catalizador (carbón activado)
Variable dependiente		
Generación de energía eléctrica	Física	Voltaje (mV)

CAPÍTULO III

MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

3.1 Antecedentes bibliográficos

3.1.1 Antecedentes Internacionales

Según Farje et al. (2017), en su artículo “Obtención de energía eléctrica a partir del almidón: influencia del HCl, temperatura y sustrato, 2009” publicado en la Revista Técnica de la Universidad Nacional de Ingeniería, se propuso obtener energía eléctrica a partir de la descomposición del almidón utilizando HCl ($0,0762\text{ N}$) en una sola etapa. El estudio consideró variables como temperatura ($14\text{--}36\text{ }^{\circ}\text{C}$), proporción almidón/agua ($1/80\text{--}1/160$), concentración de HCl ($1\times 10^{-3}\text{--}9\times 10^{-3}\text{ N}$) y tiempo de vida útil. Se emplearon celdas voltaicas con agua y almidón separadas por una membrana de acetato de celulosa, con adición de HCl a una semicelda y electrodos de grafito para registrar el voltaje. Los resultados evidenciaron que las mayores tensiones se lograron con una concentración de HCl de $9\times 10^{-3}\text{ N}$, temperaturas entre $28\text{ y }30\text{ }^{\circ}\text{C}$ y una relación agua/almidón de $150/1$, alcanzando un máximo de $214,0\text{ mV}$ al final de la vida útil. Se concluye que la concentración ácida y la temperatura son determinantes en la optimización del sistema.

Según Tuhina et al. (2019), en su artículo “*Estudio de electrolitos poliméricos basados en almidón de arrurruz y su aplicación en MFC*” publicado en *Starch - Stärke*, el objetivo fue evaluar el uso de películas de electrolito de almidón como membrana de intercambio protónico (PEM) en celdas de combustible microbianas (MFC), tecnología limitada a nivel de laboratorio debido al alto costo de las membranas comerciales. Se analizó el comportamiento electroquímico del electrolito de arrurruz como PEM en una MFC, registrándose una densidad de potencia de $\approx 16 \text{ mW m}^{-2}$ y una densidad de corriente de $\approx 85 \text{ mA m}^{-2}$. La investigación concluyó que, además de su buen desempeño, el bajo costo del material ($\approx$ INR 940 por pie^2 frente a INR 70 000 del Nafion) representa una ventaja significativa para la viabilidad de esta tecnología.

Según Herrero et al. (2013), en su artículo “Generación de electricidad a partir de aguas residuales con almidón como fuente de carbono mediante una pila de combustible microbiana sin mediadores” publicado en *Biosensors and Bioelectronics*, se buscó evaluar la capacidad de las pilas de combustible microbianas (MFC) como alternativa para producir electricidad a partir de la oxidación de materia orgánica. Se desarrolló una MFC de doble cámara, sin mediador, utilizando *Escherichia coli* y aguas residuales sintéticas derivadas de extracto de papa, con

relación de volumen ánodo/cátodo de 8:1 y electrodos de malla de titanio platinado. Los resultados mostraron una densidad máxima de potencia de 502 mW m^{-2} , similar a la obtenida con glucosa, y una reducción del 61 % en la demanda de oxígeno del agua residual. Se concluye que la fécula de papa es una fuente viable para la producción de energía y la depuración de aguas residuales en sistemas MFC sin mediador.

Según Ismail et al. (2020), en su artículo “Estudio de la conductividad del ánodo recubierto de almidón de mandioca para un sistema de pila de combustible de zinc-aire” publicado en Materials Science Forum, se planteó modificar el ánodo mediante el empleo de biomateriales. Para ello, se preparó almidón de yuca (CS) como recubrimiento conductor biodegradable en ánodos de zinc (ZnC) en una celda de combustible de zinc-aire, aplicando un método electroquímico. La conductividad se evaluó con una sonda de cuatro puntos, complementada con microscopía electrónica de barrido (SEM) y espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR). Los resultados mostraron un aumento del 30 % en la conductividad respecto al zinc puro, concluyéndose que la incorporación de almidón de yuca mejora de manera efectiva el desempeño eléctrico del ánodo.

Finalmente, según Zambrano & Arteaga (2020), en su artículo *“Generación de energía eléctrica a partir de celdas de combustible microbianas”* publicado en la *Revista Tecnoacademia*, se propuso generar electricidad a partir de aguas residuales sintéticas provenientes de lodos anaerobios. Se utilizó una celda microbiana de doble cámara, separada por una membrana de intercambio protónico DUPONT N 117, trabajando con lodos recolectados en Túquerres, Nariño. Los resultados indicaron que el sistema operó durante 123 minutos con una resistencia de 920 Ω , alcanzando una diferencia de potencial de 2,1 mV, una corriente de 1,0 μA , una potencia máxima de 2,1 nW y una densidad de potencia de 875 nW/m². La investigación concluyó que este tipo de tecnología resulta prometedora tanto para la generación de electricidad como para la remoción de materia orgánica en aguas residuales.

3.1.2 Antecedentes nacionales

Según Alayo & Baca (2016), en su tesis *“Influencia de la densidad de corriente para incrementar la generación de energía en bioceldas de almidón”* presentada en la Universidad Nacional de Trujillo, se planteó determinar el efecto de la densidad de corriente sobre la producción de energía en bioceldas de almidón. Para ello, se realizaron ensayos experimentales variando la concentración de almidón (0,5/75, 1/75, 2/75 y

4/75 g/mL) y el área de contacto de los electrodos (1,6; 4,12; 9,5 y 19 cm²), midiendo la energía con un multítester digital. Los resultados evidenciaron que la mayor densidad de corriente se obtuvo con 0,5/75 g/mL de almidón y 1,6 cm² de área de electrodo (5,58 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$), mientras que la condición de 1/75 g/mL y 4,12 cm² alcanzó 2,05 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$. Mediante conexiones en serie se registró un voltaje máximo de 1300 mV. Se concluye que la densidad de corriente disminuye con mayores concentraciones de almidón y áreas de electrodo extensas, siendo la cinética de reacción el factor determinante y sugiriendo la viabilidad de escalar el sistema con fines industriales.

Según López & Puente (2017), en su tesis “Influencia de la relación de extracción de nabo (*Brassica rapa*) / ácido tungsteno fosfórico para incrementar la producción de energía en bioceldas de almidón” de la Universidad Nacional de Trujillo, se buscó establecer la relación entre el extracto de nabo y el ácido tungsteno fosfórico en presencia de peróxido de hidrógeno, utilizando almidón de papa como sustrato. Los ensayos incluyeron variaciones en la concentración de extracto, peróxido y pruebas en ausencia de estos, midiendo el voltaje con un multítester digital. Los resultados indicaron que la aparición de moho favoreció el incremento del voltaje, alcanzando valores de 364–374 mV, especialmente cuando la relación nabo/ácido se situó entre 0 y 130 en presencia de peróxido de

hidrógeno. Se concluye que las mejores condiciones de generación eléctrica se logran con relaciones de extracto/ácido de 12,86; 104,9 y 128,6 junto con concentraciones de H_2O_2 de 0,156 y 0,146 mol/L.

Según Malo & Varas (2018), en su tesis “Influencia del peróxido de hidrógeno en la generación de energía eléctrica utilizando efluentes de remojo de curtiembre en bioceldas galvánicas” de la Universidad Nacional de Trujillo, se propuso generar energía eléctrica a partir de efluentes de remojo de curtido de pieles utilizando bioceldas con electrodos de grafito y peróxido de hidrógeno como catalizador. El sistema consistió en dos semiceldas unidas por una membrana de acetato de celulosa, evaluándose el voltaje en milivoltios y la corriente en microamperios. Los resultados mostraron que, con 0,4 g de NaCl y 5 mL de H_2O_2 , se alcanzaron 169,22 mV y 5,64 μA tras 42,67 h de reacción, además de una remoción del 77,67 % de la DQO en 43 h. Se concluye que la producción de energía está directamente asociada con la DQO, el H_2O_2 y el NaCl, evidenciando potencial para el tratamiento de efluentes industriales.

Según Vásquez & Zavala (2017), en su tesis “*Influencia de la concentración del espárrago verde en bioceldas galvánicas para generar energía eléctrica*” de la Universidad Nacional de Trujillo, se propuso

analizar la influencia de la concentración de espárrago, ácido tungsteno fosfórico y peróxido de hidrógeno en la producción de energía eléctrica mediante bioceldas electroquímicas. El voltaje se registró con multítester digital. Los resultados mostraron que el aumento en la concentración de espárrago generó incrementos exponenciales iniciales de voltaje (250 mV), seguidos por una disminución progresiva (97 mV). Asimismo, el ácido tungsteno fosfórico elevó la producción en más del 600 %, mientras que el peróxido de hidrógeno solo mostró efectos notables después de 600 h de reacción. Se concluye que es factible obtener energía eléctrica por la degradación de residuos de espárrago mediante reacciones redox en bioceldas.

Según Carrasco & Benites (2017), en su artículo “Generación de energía eléctrica mediante el reaprovechamiento de biomasa (cáscara de papa y aguas residuales) por medio de bioceldas, 2016” publicado en Revista ECIPerú, se planteó demostrar el potencial de la biomasa residual en la producción de electricidad y la reducción de residuos sólidos. Para ello, se elaboró una biocelda con cámara anódica de 357,76 mL y catódica de 265,92 mL, utilizando como sustrato líquido de glucosa extraído de cáscaras de papa y aguas residuales, complementados con NaCl al 2 % en la cámara catódica. Se probaron distintos tratamientos variando la cantidad

de cáscara de papa (100, 200, 300 y 400 g). Los resultados mostraron que el tratamiento con 400 g alcanzó el mayor rendimiento, con un voltaje de 0,80 V, corriente de 0,1 A y potencia máxima de 0,080 W durante siete días de ensayo. Se concluye que el reaprovechamiento de residuos orgánicos en bioceldas es una alternativa viable para generar energía renovable.

Finalmente, según Mendoza & Valverde (2018), en su tesis “Influencia del tiempo y concentración del colorante marrón estándar para generar energía eléctrica durante su degradación foto catalítica en bioceldas galvánicas” de la Universidad Nacional de Trujillo, se planteó generar energía eléctrica a partir de la degradación foto catalítica del colorante marrón estándar a diferentes concentraciones y tiempos de exposición. El sistema consistió en bioceldas con electrodos de grafito y membrana de acetato de celulosa, a las que se adicionó peróxido de hidrógeno, óxido de zinc y se expusieron a la radiación solar. Los resultados mostraron que bajo condiciones de 250 mg/L de colorante, 2 mL de H_2O_2 y 0,4 g de ZnO, se alcanzó una generación máxima de 7,05 μA . Se concluye que cada variable influye significativamente en la producción de energía, confirmando la utilidad de los procesos foto catalíticos en sistemas de bioceldas.

3.2 Bases teóricas

3.2.1 Plátano

El plátano (*Musa paradisiaca*) es una musácea tropical de amplia importancia alimentaria y productiva en regiones tropicales y subtropicales (Kumari et al., 2023).

Desde el punto de vista botánico, pertenece al género *Musa* y a la familia *Musaceae*, y su fruto está constituido por una fracción comestible interna y una cubierta externa o cáscara que cumple una función protectora frente al daño mecánico, la pérdida de agua y la acción de agentes externos (Vu et al., 2018).

En términos de biomasa, la cáscara representa aproximadamente entre un tercio y dos quintos del peso total del fruto, por lo que su generación como subproducto del consumo doméstico y del procesamiento agroindustrial es cuantitativamente relevante (Kumari et al., 2023; Vu et al., 2018; Yasin et al., 2025).

Desde el punto de vista composicional, el plátano es particularmente importante por su alto contenido de carbohidratos, especialmente en estados verdes o inmaduros. A diferencia de los bananos de postre, los

plátanos de cocción tienden a acumular mayores cantidades de almidón durante el desarrollo del fruto y conservan una fracción residual más alta incluso en estados avanzados de maduración. Durante la maduración ocurre una transformación metabólica progresiva en la que el almidón es hidrolizado y convertido en azúcares solubles, proceso que modifica de forma sustancial la textura, el dulzor y las propiedades tecnológicas del fruto. Por ello, el estado de madurez constituye una variable crítica cuando se estudia el plátano como fuente de almidón o como materia prima para aplicaciones tecnológicas (Cordenunsi-Lysenko et al., 2019; Li et al., 2018).

En el fruto verde, tanto la pulpa como la cáscara contienen fracciones aprovechables de almidón, aunque la pulpa presenta concentraciones más elevadas. Li et al. (2018) reportaron que, en base seca, la pulpa de plátano verde alcanzó 69,5 % de almidón, mientras que la cáscara presentó 22,6 %, lo que confirma que esta última no debe considerarse una fracción inerte o desprovista de interés tecnológico. Además, la cáscara contiene fibra dietaria, compuestos fenólicos y minerales, por lo que constituye una matriz compleja con potencial de valorización más allá de su condición de residuo (Li et al., 2018; Hikal et al., 2022; Zou et al., 2022).

3.2.1.1 Aprovechamiento del residuo

La cáscara de plátano constituye uno de los principales residuos derivados del aprovechamiento del fruto, tanto a escala doméstica como agroindustrial. Diversos estudios coinciden en que este subproducto posee un potencial significativo para ser reincorporado en cadenas de valor, lo que ha impulsado su estudio dentro de esquemas de biorrefinería y economía circular (Vu et al., 2018; Bishnoi et al., 2023; Yasin et al., 2025).

La composición de la cáscara de plátano es variable y depende del cultivar, del grado de madurez, de las condiciones de cultivo y del tratamiento postcosecha. En términos generales, las revisiones disponibles indican que la cáscara seca contiene cantidades apreciables de fibra dietaria, compuestos fenólicos, minerales, carbohidratos estructurales y una fracción variable de almidón. Hikal et al. (2022) reportaron que las cáscaras secas de plátano contienen aproximadamente del 6 al 9 % de proteína y del 20 al 30 % de fibra, mientras que las cáscaras verdes de plátano de cocción pueden alcanzar cerca de 40 % de almidón; a medida que avanza la maduración, esta fracción se reduce por conversión a azúcares solubles. De forma más específica, Li et al. (2018) encontraron 22,6 % de almidón en base seca en cáscara de plátano verde, resultado que confirma la presencia de una fracción amilácea suficientemente

importante para su aprovechamiento tecnológico (Hikal et al., 2022; Li et al., 2018).

Desde el punto de vista estructural y funcional, el almidón aislado de la cáscara presenta algunas diferencias respecto al almidón de la pulpa. Se ha descrito que el almidón de la cáscara posee gránulos ligeramente más pequeños, mayor contenido de amilosa y mayor solubilidad a altas temperaturas, además de una mayor resistencia a la hidrólisis en comparación con el almidón de la pulpa. Estas diferencias son relevantes porque influyen en el comportamiento fisicoquímico del material, en su interacción con el agua y en su posible respuesta dentro de sistemas tecnológicos donde se requiere estabilidad, gelatinización o liberación gradual de compuestos solubles (Li et al., 2018).

Además del almidón, la cáscara de plátano contiene compuestos bioactivos de interés, particularmente fenoles, flavonoides y otros antioxidantes. Vu et al. (2018) señalaron que en la cáscara se han identificado más de 40 compuestos fenólicos individuales, cuya presencia está influida por la variedad, la madurez y los tratamientos previos. A ello se suma la presencia de minerales como potasio, magnesio, calcio, sodio y fósforo, los cuales se han encontrado concentrados en proporciones

importantes en la cáscara y sus extractos (Vu et al., 2018; Oyeyinka & Afolayan, 2019; Zou et al., 2022). Esta composición explica por qué la cáscara ha despertado interés no solo como residuo orgánico, sino como fuente de compuestos funcionales con aplicaciones alimentarias, nutraceuticas y tecnologicas

Como resultado de esta composición, la valorización del residuo de plátano se ha orientado hacia diversos campos. En el sector alimentario se ha empleado como fuente de fibra y antioxidantes para el desarrollo de ingredientes funcionales; en biomateriales, como fuente de almidón y fibra para películas y biopolímeros biodegradables; en el ámbito ambiental, como biosorbente para la remoción de contaminantes gracias a la presencia de grupos funcionales activos y fracciones lignocelulósicas; y en bioenergía, como sustrato para procesos de fermentación, producción de enzimas, biogás y otras rutas de aprovechamiento energético (Bishnoi et al., 2023; Zou et al., 2022; Yasin et al., 2025).

3.2.2 Almidón

El almidón es el principal polisacárido de reserva de las plantas superiores y se biosintetiza en plastidios, principalmente en semillas, raíces, tubérculos y frutos inmaduros, donde cumple la función de

almacenar energía en forma de glucosa polimerizada (Singh et al., 2017).

Desde el punto de vista químico, está constituido por dos fracciones macromoleculares: la amilosa, formada predominantemente por cadenas lineales de unidades de D-glucosa unidas mediante enlaces α -(1 $\rightarrow$ 4), y la amilopectina, que posee una estructura altamente ramificada con enlaces α -(1 $\rightarrow$ 4) en la cadena principal y α -(1 $\rightarrow$ 6) en los puntos de ramificación. La relación entre ambas fracciones no es constante, sino que depende del origen botánico, del genotipo y del estado fisiológico del tejido vegetal; por ello, las propiedades del almidón varían significativamente entre especies y aun entre cultivares de una misma especie (Apriyanto et al., 2022; Bertoft, 2017; Hoover, 2001).

A nivel supramolecular, el almidón se organiza en gránulos semicristalinos cuya arquitectura incluye anillos de crecimiento, regiones amorfas y regiones cristalinas. Estas últimas están asociadas sobre todo con el ordenamiento de cadenas laterales de la amilopectina en dobles hélices, mientras que las zonas amorfas contienen una mayor proporción de puntos de ramificación y cadenas menos ordenadas. Esta organización explica que el almidón no sea un material homogéneo, sino una matriz biopolimérica compleja cuyo comportamiento térmico, reológico, mecánico

y de hidrólisis depende de su estructura interna. (Bertoft, 2017; Apriyanto et al., 2022; Alcázar-Alay & Meireles, 2015). En consecuencia, el estudio del almidón en cualquier aplicación tecnológica requiere considerar no solo su composición química, sino también su morfología granular, tipo de cristalinidad y grado de orden molecular.

3.2.2.1 Propiedades fisicoquímicas

Las propiedades fisicoquímicas del almidón derivan de su estructura molecular y granular. Entre ellas, la gelatinización constituye uno de los fenómenos más importantes. Este proceso ocurre cuando el almidón se calienta en presencia de agua y pierde progresivamente su orden molecular nativo; como resultado, los gránulos absorben agua, se hinchan, disminuye su cristalinidad, se pierde la birrefringencia y parte de la amilosa puede lixiviarse al medio. La temperatura y la entalpía de gelatinización dependen del origen botánico, del tamaño de gránulo, del contenido de amilosa, de la estructura de la amilopectina y del tipo de polimorfismo cristalino. En términos tecnológicos, la gelatinización modifica la viscosidad, la estabilidad de la pasta y la disponibilidad del polímero para procesos posteriores de hidrólisis o interacción con otros componentes (Ai & Jane, 2015; Alcázar-Alay & Meireles, 2015; Chakraborty et al., 2022).

Otro fenómeno central es la retrogradación, definida como la reorganización parcial de las cadenas de amilosa y amilopectina después de la gelatinización, durante el enfriamiento y almacenamiento. La amilosa tiende a reasociarse más rápidamente, mientras que la amilopectina participa en procesos de recristalización más lentos. La retrogradación influye en la firmeza del gel, la sinéresis, la estabilidad del sistema y la accesibilidad del sustrato a procesos químicos o enzimáticos. Por ello, no solo es relevante en alimentos, sino también en materiales y matrices biopoliméricas donde interesa controlar la estabilidad física y la movilidad molecular del almidón (Fu et al., 2015).

Las propiedades de empastamiento y el comportamiento reológico del almidón también son determinantes. La viscosidad de una pasta de almidón está asociada al grado de hinchamiento granular, a la cantidad de amilosa liberada, a la resistencia de los gránulos al calentamiento y al cizallamiento, y a la tendencia posterior a la reasociación molecular. Los almidones con mayor estabilidad frente al calentamiento y la agitación muestran menores valores de breakdown, mientras que la viscosidad final y el setback se relacionan con la capacidad del sistema para estructurarse durante el enfriamiento. En almidones de plátano se han documentado viscosidades pico elevadas, comportamientos pseudoplásticos y una

importante estabilidad estructural, lo que evidencia su potencial para aplicaciones donde se requiere formación de geles o matrices continuas (Yang et al., 2022; Marta et al., 2022; Ai & Jane, 2015).

La absorción de agua, el poder de hinchamiento y la solubilidad son otras propiedades esenciales. Estas dependen del tamaño y morfología de los gránulos, del contenido relativo de amilosa y amilopectina, del grado de cristalinidad y de la temperatura. En general, el aumento de la temperatura favorece el hinchamiento y la solubilización, aunque la magnitud de ese efecto cambia con la estructura del almidón. En estudios comparativos entre almidón de pulpa y de cáscara de plátano verde, ambos incrementaron su poder de hinchamiento y solubilidad con la temperatura, pero el almidón de cáscara mostró mayor solubilidad a altas temperaturas, comportamiento atribuido a su mayor contenido de amilosa aparente (Li et al., 2018; Yang et al., 2022).

La digestibilidad e hidrólisis del almidón también merecen atención en esta investigación, porque condicionan la liberación de compuestos más simples y, por tanto, la disponibilidad química del sustrato. En términos generales, la susceptibilidad del almidón a la hidrólisis depende de su tamaño de gránulo, integridad granular, porosidad, estructura cristalina y

contenido de amilosa. En el caso del almidón de plátano, se reportan fracciones importantes de almidón resistente, especialmente en materiales verdes o poco maduros. En la cáscara de plátano verde, además, se ha observado una hidrólisis más lenta y una mayor proporción de almidón resistente respecto de la pulpa, lo cual se asocia a su mayor contenido de amilosa y a su estructura cristalina tipo B. Estas características son importantes porque el grado de accesibilidad química del almidón influye en su comportamiento en sistemas donde se busca liberación progresiva de especies aprovechables para la generación eléctrica (Li et al., 2018; Marta et al., 2022; Yang et al., 2022).

Estudios sobre almidón de cáscara de *Musa paradisiaca* también han mostrado que la madurez del fruto modifica propiedades como pH, viscosidad, temperatura de gelatinización y contenido de amilosa. Esto confirma que el almidón de cáscara no debe considerarse una materia constante, sino un material sensible a la variedad y al estado de maduración, aspecto que debe controlarse metodológicamente en investigaciones experimentales (Li et al., 2018; Marta et al., 2022; Fauzi et al., 2025).

3.2.2.2 Aplicaciones y relevancia para la bioelectroquímica

Debido a su abundancia, biodegradabilidad, bajo costo y capacidad de modificación física, química y enzimática, el almidón ha sido ampliamente utilizado en la industria alimentaria, farmacéutica y de biomateriales. En alimentos se emplea como espesante, gelificante, estabilizante y texturizante; en farmacia, como excipiente, aglutinante y desintegrante; y en materiales, como base para bioplásticos, películas y sistemas biodegradables (Alcázar-Alay & Meireles, 2015; Surendren et al., 2022). Estas aplicaciones se sustentan en su capacidad para formar pastas, geles y matrices continuas, así como en su afinidad por el agua y su posibilidad de ser mezclado con otros polímeros o aditivos.

Desde el punto de vista electroquímico, el almidón ha cobrado interés como biopolímero funcional en electrolitos poliméricos, hidrogeles conductores, sensores y sistemas de almacenamiento de energía. Su utilidad no radica en que sea, por sí mismo, un excelente conductor electrónico, sino en su capacidad para formar redes hidratadas, retener plastificantes o sales, favorecer el transporte iónico y servir como matriz renovable para la fabricación de materiales electroquímicos más sostenibles. Por ello, la literatura reciente reporta aplicaciones del almidón en baterías, supercapacitores y electrolitos biopoliméricos, lo que confirma

su valor como plataforma material en dispositivos electroquímicos de base biológica (Varshney & Gupta, 2011; Chen et al., 2023).

En sistemas bioelectroquímicos, la evidencia disponible se concentra principalmente en celdas de combustible microbianas, donde sustratos ricos en almidón pueden ser hidrolizados y posteriormente oxidados para producir electricidad. Se ha demostrado experimentalmente que un sistema microbiano puede operar utilizando almidón como sustrato y que aguas residuales con almidón como fuente de carbono también pueden generar energía eléctrica con remoción simultánea de materia orgánica. Además, las revisiones sobre celdas microbianas coinciden en que la conversión de energía química almacenada en compuestos orgánicos hacia electricidad depende de la disponibilidad del sustrato, del transporte de electrones, de la configuración de electrodos y de las condiciones operativas del sistema (Niessen et al., 2004; Herrero-Hernández et al., 2013; Santoro et al., 2017).

3.2.3 Biocelda galvánica

En el marco de esta investigación, la biocelda galvánica debe entenderse como una celda electroquímica capaz de transformar energía química en energía eléctrica mediante reacciones espontáneas de

oxidación y reducción entre dos electrodos con diferente potencial electroquímico. Conceptualmente, este sistema no debe confundirse con las celdas de combustible microbianas. En estas últimas, la liberación de electrones depende de la actividad metabólica de microorganismos electroactivos; en cambio, en una biocelda galvánica convencional la generación de corriente se sustenta en la diferencia de potencial entre materiales anódicos y catódicos, así como en la conducción iónica del medio electrolítico. Por ello, cuando en esta investigación se emplea el término biocelda, se alude a una celda galvánica electroquímica construida con componentes o matrices de naturaleza biológica o biodegradable, y no a un sistema bioelectrocatalítico mediado por microorganismos (Chandler et al., 2015; Jalili et al., 2024; Logan et al., 2006; Rabaey & Verstraete, 2005).

Desde el punto de vista electroquímico, una celda galvánica opera porque en el ánodo ocurre la oxidación del material más activo, proceso que libera electrones hacia el circuito externo, mientras que en el cátodo ocurre la reacción de reducción correspondiente. De esta manera, los electrones fluyen espontáneamente del ánodo al cátodo a través de la carga externa, y el transporte interno de iones en el electrolito mantiene la electroneutralidad del sistema. En consecuencia, la energía química

almacenada en los materiales reactivos se convierte en trabajo eléctrico útil. El voltaje de la celda representa la diferencia de potencial entre ambos electrodos y, en condiciones reales, depende no solo de la naturaleza química de los materiales, sino también de las resistencias internas, la polarización y las limitaciones de transporte de masa dentro del sistema (Biesheuvel et al., 2009; Chandler et al., 2015; Liu et al., 2016).

La arquitectura básica de una biocelda galvánica comprende dos electrodos, un electrolito y un medio separador o puente iónico (Figura 1). El ánodo corresponde al electrodo donde se desarrolla la oxidación, mientras que el cátodo es el sitio donde se lleva a cabo la reducción. Entre ambos debe existir un medio conductor de iones que permita cerrar el circuito interno sin provocar contacto directo entre los electrodos, lo cual podría inducir cortocircuito o disminuir la eficiencia del sistema. En configuraciones simples, este papel puede ser desempeñado por soluciones salinas, geles o puentes salinos; en diseños más elaborados, por separadores o membranas que físicamente aíslan los compartimentos y, al mismo tiempo, facilitan el transporte iónico. La función de estos separadores es crítica porque sus propiedades de espesor, porosidad, afinidad con el electrolito y resistencia interna afectan directamente la estabilidad operativa y el rendimiento electroquímico del dispositivo

(Lingappan et al., 2023; Biesheuvel et al., 2009).

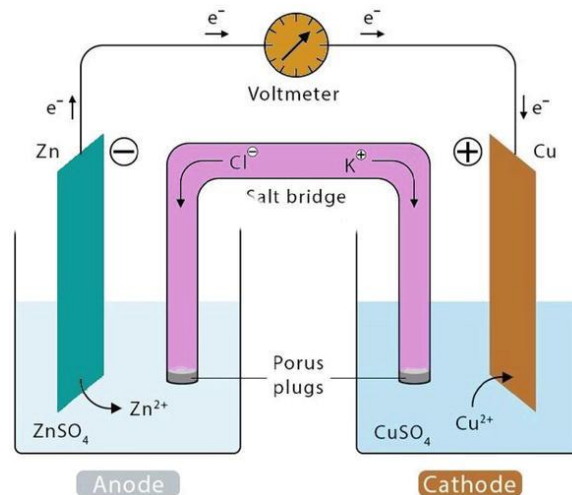


Figura 1

Esquema de una celda electroquímica

Nota. Extraído de *Types and Applications of Electrochemical Cells*, por G. Nabi et al., 2026, en *Functional nanostructures for energy conversion and advanced applications*, IntechOpen.

El funcionamiento real de la biocelda no depende únicamente de la diferencia teórica de potencial entre metales; también está gobernado por fenómenos de polarización y por la resistencia interna total del sistema. En términos prácticos, una fracción del potencial disponible se pierde por activación electroquímica, por limitaciones difusionales y por caída óhmica.

La polarización de activación se asocia a la energía necesaria para que ocurran las reacciones de transferencia de carga en la superficie de los electrodos; la polarización por concentración se relaciona con restricciones en el transporte de especies químicas hacia o desde dichas superficies; y la polarización óhmica responde a la resistencia del electrolito, de los electrodos, de los contactos y del separador. Estas pérdidas explican por qué el voltaje medido bajo carga suele ser menor que el voltaje en circuito abierto, y por qué la estabilidad de corriente puede disminuir conforme avanza la descarga (Alipour et al., 2020; Biesheuvel et al., 2009).

3.2.3.1 Características y aplicaciones

En sistemas galvánicos basados en zinc y cobre, ampliamente empleados como modelo experimental por su bajo costo, disponibilidad y comportamiento electroquímico conocido, el rendimiento depende de manera importante de la composición del electrolito y de las condiciones del medio. Chandler et al. (2015) observaron que, en un sistema Zn–Cu con soluciones de NaCl, el potencial de celda y la corriente máxima estuvieron influenciados por la concentración salina, la disponibilidad de oxígeno disuelto y las limitaciones de difusión hacia el cátodo. De manera particular, estos autores señalaron que la reacción catódica dominante fue la reducción de oxígeno más que la evolución de hidrógeno, lo que demuestra

que el desempeño de la celda no solo está determinado por los metales empleados, sino también por la química del medio y la disponibilidad de especies reducibles. Este aspecto es relevante porque, en bioceldas formuladas con matrices húmedas o gelificadas, la movilidad iónica y la difusión de especies redox condicionan la magnitud y la estabilidad del voltaje generado (Chandler et al., 2015).

En investigaciones que incorporan materiales biopoliméricos, el electrolito deja de ser únicamente una solución líquida y pasa a considerarse una matriz funcional de conducción iónica. En este contexto, el almidón adquiere especial interés por ser un polisacárido abundante, biodegradable, económico y capaz de formar dispersiones, geles e hidrogeles. Sin embargo, el almidón por sí solo no es un conductor iónico eficiente; su comportamiento depende de su gelatinización, del contenido de agua, de la relación amilosa/amilopectina y de la presencia de sales o plastificantes que favorezcan la movilidad de las especies iónicas. Hernández-Jaimes et al. (2015) demostraron que, tras la gelatinización, la resistencia eléctrica de las dispersiones de almidón está fuertemente influenciada por la microestructura insoluble de la matriz, mientras que la conductividad puede incrementarse cuando esa estructura se modifica. De forma complementaria, revisiones recientes indican que los electrolitos

poliméricos a base de almidón mejoran su desempeño cuando se incorporan sales, plastificantes o estructuras híbridas que incrementan la movilidad iónica y reducen el carácter intrínsecamente aislante del polímero (Hernandez-Jaimes et al., 2015; Rehman et al., 2025).

La relevancia del almidón y de otros biopolímeros en dispositivos electroquímicos ha crecido porque permiten desarrollar materiales más sostenibles y compatibles con aplicaciones de baja potencia, sensores flexibles y sistemas energéticos biodegradables.

Se ha reportado investigaciones donde matrices basadas en almidón pueden emplearse como hidrogeles conductivos o como anfitriones de electrolitos en dispositivos electroquímicos, siempre que se optimicen simultáneamente sus propiedades mecánicas, su estabilidad y su conductividad iónica. Estudios recientes han mostrado que formulaciones con almidón, sales y plastificantes pueden integrarse en baterías o dispositivos tipo celda galvánica, evidenciando que este biopolímero no solo cumple una función estructural, sino también electrofuncional cuando se controla adecuadamente su composición (Ma et al., 2022; Chiaoprakobkij et al., 2024; Xie, 2024).

3.2.3.2 Factores de influyen

Bajo esta perspectiva, el desempeño de una biocelda galvánica elaborada con matrices a base de almidón está condicionado por varios factores interrelacionados. En primer lugar, influyen la naturaleza y geometría de los electrodos, debido a que el área superficial, la conductividad eléctrica, la rugosidad y la afinidad interfacial con el electrolito afectan la velocidad de transferencia de carga. En segundo lugar, la composición del electrolito resulta determinante, ya que la concentración de sales, el contenido de humedad, el pH y la viscosidad modifican la conductividad iónica y la resistencia interna. En tercer lugar, las propiedades del separador o puente salino condicionan la continuidad del transporte iónico y la magnitud de las pérdidas óhmicas. Finalmente, variables operativas como temperatura, tiempo de descarga y exposición al oxígeno pueden alterar tanto la estabilidad del voltaje como la densidad de corriente. En conjunto, estos factores explican que el rendimiento experimental de la biocelda sea el resultado de una interacción entre termodinámica, cinética electroquímica y transporte de masa, más que de la mera presencia de dos electrodos metálicos sumergidos en un medio conductor (Alipour et al., 2020; Chandler et al., 2015; Lingappan et al., 2023).

3.3 Definición de términos

3.3.1 Cáscara de plátano

Es la cubierta externa del fruto del plátano y constituye un subproducto del consumo y procesamiento de esta musácea. Desde el punto de vista fisicoquímico, la cáscara de plátano puede contener fibra, carbohidratos, minerales y fracciones de almidón, cuya proporción varía según el cultivar y el estado de madurez del fruto (Hikal et al., 2022).

3.3.2 Catalizador

Es una sustancia que incrementa la velocidad de una reacción química sin modificar el cambio global de energía libre estándar de Gibbs del proceso; durante la reacción participa y posteriormente se regenera, por lo que no se consume de manera neta (International Union of Pure and Applied Chemistry [IUPAC], 2025a).

3.3.3 Densidad de corriente

Es la magnitud que relaciona la corriente eléctrica con el área sobre la cual esta circula. En sistemas electroquímicos se emplea para expresar la intensidad de corriente referida al área del electrodo, lo que permite comparar el comportamiento de distintos sistemas independientemente de su tamaño (International Union of Pure and Applied Chemistry [IUPAC], 2025b).

3.3.4 Densidad de potencia

Es la potencia eléctrica generada o suministrada por una celda electroquímica referida a una magnitud geométrica del sistema. En la nomenclatura de ingeniería electroquímica, la densidad de potencia se define como la potencia dividida entre el volumen de la celda, aunque en celdas electroquímicas también puede reportarse por unidad de área activa para fines comparativos de desempeño (Gritzner & Kreysa, 1993).

3.3.5 Corriente eléctrica

Es la tasa de flujo de carga eléctrica a través de un conductor o circuito. En términos físicos, expresa la cantidad de carga que atraviesa una sección determinada por unidad de tiempo y se mide en amperios (OpenStax, 2020).

3.3.6 Potencia eléctrica

Es la rapidez con la que la energía eléctrica se transfiere o transforma en un circuito. Matemáticamente, se expresa como el producto del voltaje y la corriente eléctrica, y su unidad de medida en el Sistema Internacional es el watt (OpenStax, 2022).

3.3.7 Ánodo

Es el electrodo en el que tiene lugar la reacción de oxidación dentro de una celda electroquímica; en él se liberan electrones que luego circulan a través del circuito externo (IUPAC, 2025c).

3.3.8 Cátodo

Es el electrodo en el que ocurre la reacción de reducción dentro de una celda electroquímica; en él se consumen los electrones procedentes del circuito externo (IUPAC, 2025d).

3.3.9 Electrolito

Es el medio conductor en el que el paso de la corriente eléctrica está acompañado por el movimiento de iones. También se entiende como la sustancia que, al disolverse en un solvente o al fundirse, produce especies iónicas capaces de transportar carga (IUPAC, 2025e).

3.3.10 Capacidad electrolítica

En el contexto de esta investigación, se entiende como la capacidad de una sustancia o de una solución para generar, contener y movilizar iones que permitan la conducción de corriente eléctrica. Esta propiedad depende de la naturaleza y concentración de los iones presentes, así como de su movilidad en el medio (IUPAC, 2025f).

CAPÍTULO IV

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

4.1 Tipo y diseño de investigación

4.1.1 Tipo de investigación

La investigación adoptó un enfoque cuantitativo desarrollándose de manera aplicada, ya que las variables de estudio fueron medidas numéricamente mediante parámetros fisicoquímicos y eléctricos, este enfoque permitió procesar los datos mediante herramientas estadísticas y establecer relaciones objetivas entre los factores evaluados y la respuesta del sistema experimental.

4.1.2 Nivel de investigación

El nivel de investigación fue explicativo, ya que el estudio buscó explicar el comportamiento del sistema a partir de la manipulación controlada de factores experimentales y del análisis de sus efectos sobre las variables de respuesta.

4.1.3 Diseño de la investigación

El diseño de investigación fue experimental, puesto que se manipularon las variables independientes bajo condiciones controladas de laboratorio para observar su efecto sobre la variable dependiente.

Específicamente se utilizó un DCA (Diseño Completo al Azar) con arreglo factorial $2 \times 2 \times 2$, es decir que constó con tres criterios de clasificación con dos niveles cada uno. En la Tabla 2 se muestran los factores considerados, sus respectivas unidades de medida y los niveles establecidos para el análisis experimental.

Tabla 2

Niveles de parámetros de control

Parámetro de control	Niveles	
Factor A: Dosis de almidón	- 10 g/l	- 20 g/l
Factor B: Catalizador	- Con carbón	- Sin carbón
Factor C: Oxigenación	- Con oxigenación	- Sin oxigenación

4.2 Población y muestra

4.2.1 Población

La población estuvo constituida por las cáscaras de plátano (*Musa paradisiaca*) generadas y recolectada como residuo orgánico en el mercado mayorista Miguel Grau, ubicado en la ciudad de Tacna. La recolección se realizó en los meses de mayo, junio y julio, coincidiendo con el ingreso periódico de nueva carga observado en el mercado, particularmente los días miércoles.

4.2.2 Muestra

La muestra biológica estuvo conformada por 10 kg de cáscara de plátano fresca recolectada en el mercado mayorista Miguel Grau, cantidad que fue acondicionada y procesada para la obtención del almidón requerido en los análisis fisicoquímicos y en la preparación de los tratamientos experimentales.

4.2.3 Muestreo

El muestreo fue no probabilístico por conveniencia o intencional, debido a que la recolección del material biológico se realizó en función de la disponibilidad de cáscaras de plátano en el mercado de abasto. Como criterios de selección se estableció la elección de cáscaras frescas, libres de contaminación visible, sin signos avanzados de descomposición y con características relativamente homogéneas de madurez y estado físico, con el fin de reducir la variabilidad asociada a la materia prima.

4.3 Técnicas aplicadas en la recolección de la información

Se empleó la técnica de observación experimental directa, complementada con medición instrumental de variables fisicoquímicas y eléctricas. Para el registro de datos se utilizaron fichas de observación y hojas de control diseñadas para cada etapa del experimento. La

información obtenida correspondió a los tres objetivos específicos del estudio: caracterización fisicoquímica de la cáscara y del almidón extraído, determinación de las condiciones operativas óptimas del sistema de biocelda galvánica y evaluación del desempeño eléctrico del sistema en función del tiempo de operación. La metodología experimental se desarrolló en tres etapas principales, tal como se resume en la Figura 2.

En la Figura 2 se muestra las principales etapas de las cuales se llevó a cabo el desarrollo del experimento y la obtención de resultados.

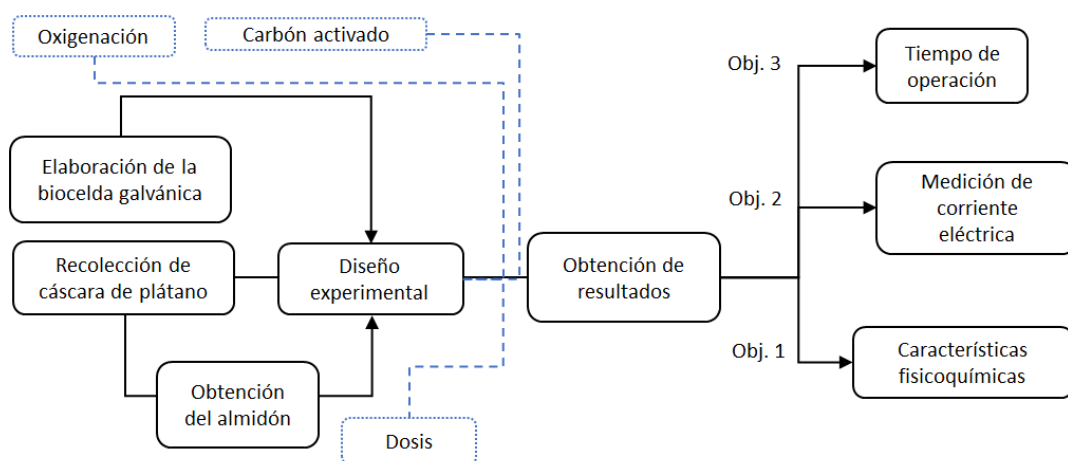


Figura 2

Etapas del procedimiento experimental

4.3.1 Análisis de las características fisicoquímicas de la cáscara de plátano (*Musa paradisiaca*) y su contenido de almidón

En esta etapa, las cáscaras de plátano recolectadas fueron sometidas a un proceso de selección manual para retirar impurezas, residuos extraños y fracciones deterioradas. Posteriormente, se lavaron con agua para eliminar suciedad superficial y se secaron a temperatura ambiente. Una vez acondicionadas, se procedió a la obtención del almidón mediante una metodología adaptada de Correa et al. (2017), basada en operaciones sucesivas de trozado, trituración, filtración, sedimentación/decantación y recuperación del material amiláceo. Finalmente, el almidón obtenido fue secado y conservado para su uso en las pruebas de caracterización y en la preparación de los tratamientos.

Posteriormente, tanto la cáscara como el almidón extraído fueron sometidos a análisis fisicoquímicos empleando los siguientes métodos:

- Se determinó el contenido de humedad mediante secado en estufa según AOAC 925.09.
- Se determinó el contenido de cenizas por incineración en mufla a 550 °C según AOAC 923.03
- Se determinó el pH mediante lectura directa con potenciómetro previamente calibrado

- Se determinó la temperatura de gelatinización del almidón mediante calentamiento controlado y observación del cambio de consistencia, de acuerdo con el procedimiento descrito por Grace (1977).
- Se determinó el contenido de almidón en porcentaje respecto al peso de la muestra inicial procesada.

4.3.2 Determinación de la dosis y las condiciones operativas óptimas del sistema de biocelda galvánica para la generación de energía eléctrica a partir de almidón de cáscara de plátano (*Musa paradisiaca*)

Para la evaluación experimental se construyeron bioceldas galvánicas de doble cámara compuestas por un compartimiento anódico y un compartimiento catódico como se puede observar en la Figura 3. Cada cámara presentó dimensiones internas de 20 × 15 × 15 cm, con un volumen geométrico de 4,5 l. El volumen de operación se fijó en 4,0 l por compartimiento, correspondiente al 90 % de la capacidad total, a fin de dejar un espacio libre del 10 % que evitara derrames y permitiera un funcionamiento estable del sistema.

Como electrodos se emplearon elementos metálicos cilíndricos de 13 cm de longitud y 1,5 cm de diámetro, utilizados como ánodo y cátodo.

Considerando que una fracción del electrodo permaneció fuera del medio electrolítico, el área efectiva de contacto con la solución se estimó en 50,65 cm² por electrodo, valor correspondiente a la superficie realmente expuesta durante la operación del sistema.

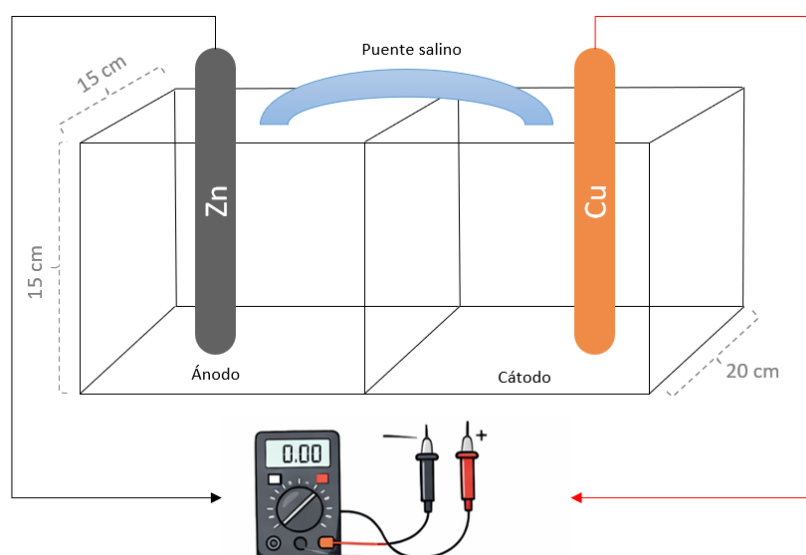


Figura 3

Esquema de montaje del sistema de celdas biogalvánicas

Las semiceldas se conectaron mediante un puente salino gelificado preparado con una solución saturada de cloruro de sodio inmovilizada en gelatina sin sabor, adicionada en cantidad suficiente para lograr la solidificación de la mezcla dentro de un tubo flexible de PVC de 15 cm de longitud y 1,5 cm de diámetro. Este fue adaptado de metodologías previas

en las que se emplearon puentes salinos de NaCl en gelatina y geles electrolíticos a base de gelatina con NaCl, como medio de conducción iónica entre semiceldas (Amrulloh et al., 2019; Choudhury et al., 2008).

Las soluciones de almidón se prepararon a dos niveles de concentración, 10 g/l y 20 g/l, utilizando agua destilada y calentamiento controlado entre 70 y 80 °C, con el fin de favorecer la dispersión y gelatinización parcial del almidón.

Además de la dosis de almidón, se evaluaron dos factores operativos adicionales: la presencia o ausencia de carbón activado como material catalítico y la condición de oxigenación del cátodo. El carbón activado, de procedencia comercial, se aplicó sobre la superficie del electrodo catódico para conformar una capa catalítica en la interfaz electrodo–electrolito, siguiendo el criterio reportado en estudios donde este material se emplea como catalizador catódico fijado sobre un soporte conductor (Cheng & Wu, 2013; Ge & He, 2015; Merino-Jimenez et al., 2016). La oxigenación del cátodo se evaluó en dos condiciones: con aireación y sin aireación. Para la condición aireada se utilizó una bomba de aire de una salida, alimentada a 220 V y con potencia de 2 W.

La combinación de los factores evaluados, dosis de almidón, presencia de carbón activado y condición de aireación del cátodo, dio lugar a ocho tratamientos experimentales, cada uno realizado por triplicado.

Todas las conexiones del sistema fueron adecuadamente aisladas a fin de minimizar pérdidas, fugas o interferencias externas. El montaje experimental se desarrolló en condiciones de laboratorio, a temperatura ambiente comprendida entre 25 y 28 °C.

Una vez ensambladas las bioceldas, se registraron los valores de voltaje y corriente eléctrica mediante un multímetro digital modelo UNI-T UT33D. Durante el periodo de evaluación de 1 h, para cada repetición se registraron los valores de voltaje y corriente, identificándose el voltaje máximo alcanzado, la densidad de corriente correspondiente y el tiempo transcurrido hasta alcanzar dicho valor máximo.

A partir de la corriente medida se calculó la densidad de corriente mediante la siguiente ecuación:

$$J = \frac{I}{A}$$

donde J es la densidad de corriente (mA/cm^2), I es la corriente eléctrica registrada (mA) y A es el área efectiva del electrodo (cm^2).

4.3.3 Evaluación del desempeño eléctrico de una biocelda galvánica en función de la energía generada y del tiempo de operación empleando el almidón de cáscara de plátano (*Musa paradisiaca*)

Una vez identificadas las mejores condiciones operativas del sistema, se seleccionó el tratamiento de mayor rendimiento para realizar la evaluación temporal del desempeño eléctrico de la biocelda. Esta etapa se desarrolló durante un periodo continuo de 24 horas de operación.

Durante el ensayo se registraron valores de voltaje y corriente a intervalos regulares por cada minuto utilizando un multímetro digital. Con los datos obtenidos se calculó la potencia instantánea de acuerdo con la relación:

$$P = V \times I$$

donde P es la potencia eléctrica, V el voltaje e I la corriente eléctrica.

Posteriormente, se elaboraron las curvas voltaje-tiempo para describir el comportamiento dinámico del sistema. Durante 24 h se registraron periódicamente el voltaje y la densidad de corriente del tratamiento óptimo, y que a partir de esos valores se calculó la corriente eléctrica mediante el producto entre la densidad de corriente y el área efectiva del electrodo, y posteriormente se determinó la potencia

instantánea como el producto del voltaje por la corriente. La energía total generada se estimó mediante integración numérica del área bajo la curva potencia-tiempo utilizando el método trapezoidal y expresando los resultados en milivatios-hora (mWh), siguiendo protocolos descritos por Kim et al. (2005) y Santoro et al. (2017). Esta etapa permitió identificar la estabilidad operativa del sistema, la tendencia de decaimiento del voltaje y el comportamiento global de la biocelda bajo las condiciones de mayor rendimiento.

4.4 Materiales y equipos

4.4.1 Materiales

- Cáscara de plátano recolectada
- Envases de vidrio
- Tubo de plástico
- Varillas de vidrio
- Electrodo de zinc y cobre
- Terminales
- Conectores para Multitester
- Pegamento
- Pinza de corte diagonal
- Cables mellizos de parlantes

- Agua de mar

4.4.2 Equipos

- Balanza analítica
- Cocina eléctrica
- Estufa
- pHmetro
- Multitéster digital
- Bomba de aire

4.4.3 Reactivo

- Agua destilada
- Cloruro de sodio
- Gelatina sin azúcar
- Carbón activado

4.5 Análisis estadístico

Para el primer objetivo específico, correspondiente a la caracterización fisicoquímica de la cáscara de plátano y del almidón extraído, se calcularon las medias de tendencia central y dispersión, expresadas como promedio y desviación estándar. Adicionalmente, se

aplicó la prueba t de Student para una muestra, comparando los valores experimentales con valores de referencia teóricos reportados en la literatura, con un nivel de significancia de 5 %.

Para el segundo objetivo específico, previamente se verificó el cumplimiento de los supuestos de normalidad de residuos, homogeneidad de varianzas e independencia. Luego se empleó un análisis de varianza (ANOVA) y cuando se identificaron diferencias significativas entre tratamientos o combinaciones de factores ($p < 0,05$), se aplicó la prueba de comparaciones múltiples de Tukey para establecer qué medias diferían estadísticamente entre sí. Asimismo, se calculó el coeficiente de variación para valorar la precisión experimental.

Para el tercer objetivo específico, referido al desempeño eléctrico de la biocelda en función del tiempo de operación, se procesaron los registros de voltaje y corriente para calcular la potencia instantánea y la energía total generada. Además, se construyó la curva de comportamiento temporal y se analizaron descriptivamente la estabilidad, el punto de máximo rendimiento y la tendencia de decaimiento del sistema durante las 24 horas de evaluación.

CAPÍTULO V

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Resultados

5.1.1 Características fisicoquímicas de la cáscara de plátano (*Musa paradisiaca*) y su contenido de almidón

En la Tabla 3 se presentan los resultados de la caracterización fisicoquímica de la cáscara de plátano y del almidón extraído. Para cada parámetro se calcularon la media y la desviación estándar, y posteriormente se aplicó una prueba t de Student para una muestra utilizando valores referenciales bibliográficos reportados para matrices comparables. Dado que la composición de la cáscara de plátano y de su almidón puede variar en función de la variedad, el estado de madurez, las condiciones postcosecha y el método de extracción, esta comparación debe interpretarse como un contraste referencial y no como un valor fijo.

Cabe precisar que el contenido de almidón de la cáscara fue de 7,1 $\pm$ 1,4 %, expresado en base húmeda sobre cáscara fresca. Considerando la humedad determinada en la muestra (78,4 %), este valor equivale aproximadamente a 32,9 % en base seca. Desde esta perspectiva, el resultado se encuentra dentro del intervalo reportado para cáscara de

plátano verde en base seca (entre el 16 al 48,5 %). Por ello, el valor obtenido confirma la presencia de una fracción amilácea aprovechable en la biomasa evaluada.

Tabla 3

Características fisicoquímicas de la cáscara de plátano y el almidón

Parámetro	Promedio	Valor referencial*	T calculado	P valor
Cáscara de plátano				
Contenido de almidón (%)	7,1 ± 1,4	7,0	0,2258	0,8263
Humedad (%)	78,4 ± 2,1	75,0	5,1198	0,0000
Cenizas (%)	8,2 ± 0,9	7,5	2,4595	0,0361
Almidón de cáscara de plátano				
pH	6,3 ± 0,3	5,5	1,0540	0,3193
Gelatinización (°C)	69,2 ± 1,8	70,0	-1,4054	0,1934

Nota. El contenido de almidón se expresó en base húmeda sobre cáscara fresca. Considerando una humedad de 78,4 %, el contenido equivalente en base seca fue de 32,9 %. La comparación bibliográfica del almidón debe interpretarse preferentemente en base seca, ya que varios estudios reportan este parámetro de esa manera. * Valores referenciales bibliográficos obtenidos de investigaciones previas sobre cáscara de plátano, polvo de cáscara y almidón extraído de Musa paradisiaca o banana verde, reportadas por Li et al. (2018), Vasundhara et al. (2021), Ezech et al. (2017), Mohd Dom et al. (2021), Umoh (2024) y Bishnoi et al. (2023).

En términos generales, los resultados obtenidos evidencian que la cáscara de plátano analizada presentó una composición fisicoquímica compatible con su valorización como fuente de almidón. Aunque la comparación estadística mostró diferencias para humedad y cenizas respecto de los referentes seleccionados, los valores experimentales permanecen dentro de la variabilidad esperable para este residuo agroindustrial. Por tanto, la caracterización realizada respalda la idoneidad de la materia prima para su empleo en el sistema de biocelda galvánica evaluado en esta investigación.

5.1.2 Determinación de la dosis y las condiciones operativas óptimas del sistema de biocelda galvánica para la generación de energía eléctrica a partir de almidón de cáscara de plátano (*Musa paradisiaca*)

Para determinar la dosis y las condiciones operativas óptimas del sistema de biocelda galvánica, se evaluó un diseño completamente al azar con arreglo factorial $2 \times 2 \times 2$, considerando como factores la dosis de almidón de cáscara de plátano (10 y 20 g/L), la presencia o ausencia de carbón activado como catalizador y la condición de oxigenación del cátodo. Las variables de respuesta analizadas fueron el voltaje máximo (V), la

densidad de corriente (mA/cm²) y el tiempo transcurrido hasta alcanzar el voltaje máximo (min).

En el caso del voltaje máximo, el análisis de varianza mostró efectos significativos de los tres factores principales: dosis, catalizador y oxigenación ($p < 0,05$). No se detectaron interacciones significativas entre factores, lo que indica que el efecto de cada uno se mantuvo de manera consistente independientemente del nivel de los otros factores. El coeficiente de variación fue de 2,62 %, valor que evidencia adecuada precisión experimental.

Tabla 4
ANOVA factorial para voltaje máximo

Fuente	gl	SC	MS	F	p
Dosis (A)	1	0,055777	0,055777	710,913	<0,001
Catalizador (B)	1	0,013207	0,013207	168,332	<0,001
Oxigenación (C)	1	0,006567	0,006567	83,701	<0,001
AB	1	0,000035	0,000035	0,447	0,513
BC	1	0,000018	0,000018	0,234	0,635
AC	1	0,000002	0,000002	0,026	0,874
ABC	1	0,000247	0,000247	3,149	0,095
Error	16	0,001255	0,000078		

CV = 2,62%

En promedio, la dosis de 20 g/L presentó un mayor voltaje promedio que la dosis de 10 g/L. Del mismo modo, la presencia de carbón activado y

la condición con oxigenación incrementaron el voltaje máximo del sistema respecto de sus niveles sin catalizador y sin oxigenación.

Tabla 5
Medias de los factores para voltaje máximo

Factor	Nivel	Media	DE
Dosis	10	0,2898	0,0309
Dosis	20	0,3862	0,0314
Catalizador	Con	0,3614	0,0552
Catalizador	Sin	0,3145	0,0526
Oxigenación	Con	0,3545	0,0557
Oxigenación	Sin	0,3214	0,0575

A nivel de tratamientos, T8 (20 g/L, con catalizador y con oxigenación) presentó el mayor voltaje máximo promedio ($0,4230 \pm 0,0072$ V), mientras que T1 (10 g/L, sin catalizador y sin oxigenación) registró el menor valor ($0,2530 \pm 0,0044$ V). La prueba de Tukey mostró que T8 fue estadísticamente superior a la mayoría de los tratamientos, aunque no difirió de T7.

Tabla 6*Tukey y medias por tratamiento para voltaje máximo*

Tratamiento	Dosis	Cat	O2	Media $\pm$ DE	Significancia
T8	20	Con	Con	0,4230 $\pm$ 0,0072	a
T7	20	Con	Sin	0,3987 $\pm$ 0,0104	ab
T6	20	Sin	Con	0,3807 $\pm$ 0,0070	b
T5	20	Sin	Sin	0,3423 $\pm$ 0,0038	c
T4	10	Con	Con	0,3323 $\pm$ 0,0121	c
T3	10	Con	Sin	0,2917 $\pm$ 0,0096	d
T2	10	Sin	Con	0,2820 $\pm$ 0,0121	d
T1	10	Sin	Sin	0,2530 $\pm$ 0,0044	e

Con respecto a la densidad de corriente, fue influida significativamente por la dosis, el catalizador y la oxigenación. Ninguna interacción resultó significativa, lo que indica que los efectos principales fueron estables y no dependieron de combinaciones específicas entre factores. El coeficiente de variación fue de 1,92 %, confirmando baja variabilidad residual.

Tabla 7*ANOVA factorial para densidad de corriente*

Fuente	gl	SC	MS	F	p
Dosis (A)	1	0,549038	0,549038	1 295,409	<0,001
Catalizador (B)	1	0,110704	0,110704	261,197	<0,001
Oxigenación (C)	1	0,059800	0,059800	141,094	<0,001
AB	1	0,000561	0,000561	1,323	0,267
BC	1	0,000081	0,000081	0,190	0,668
AC	1	0,000043	0,000043	0,101	0,755
ABC	1	0,000140	0,000140	0,331	0,573
Error	16	0,006781	0,000424		

CV = 1,92%

Las medias mostraron que la densidad de corriente aumentó claramente con 20 g/L, con el uso de carbón activado y con oxigenación. El efecto de la dosis fue el más marcado, seguido por el catalizador y luego por la oxigenación.

Tabla 8

Medias de los factores para densidad de corriente

Factor	Nivel	Media	DE
Dosis	10	0,9196	0,0842
Dosis	20	1,2221	0,0954
Catalizador	Con	1,1388	0,1725
Catalizador	Sin	1,0029	0,1621
Oxigenación	Con	1,1208	0,1766
Oxigenación	Sin	1,0209	0,1717

T8 registró la mayor densidad de corriente y conformó el grupo estadístico superior. T7 y T6 fueron estadísticamente similares entre sí, pero inferiores a T8. T1 mostró la menor densidad de corriente, confirmando que la ausencia simultánea de catalizador y oxigenación, junto con la dosis baja, limitó la respuesta del sistema.

Tabla 9*Tukey y medias por tratamiento para densidad de corriente*

Tratamiento	Dosis	Cat	O2	Media $\pm$ DE	Significancia
T8	20	Con	Con	1,3503 $\pm$ 0,0183	a
T7	20	Con	Sin	1,2393 $\pm$ 0,0245	b
T6	20	Sin	Con	1,1973 $\pm$ 0,0344	b
T5	20	Sin	Sin	1,1013 $\pm$ 0,0070	c
T4	10	Con	Con	1,0297 $\pm$ 0,0133	d
T3	10	Con	Sin	0,9357 $\pm$ 0,0222	e
T2	10	Sin	Con	0,9057 $\pm$ 0,0129	e
T1	10	Sin	Sin	0,8073 $\pm$ 0,0197	f

En cuanto al tiempo transcurrido hasta alcanzar el voltaje máximo, se identificaron efectos significativos de la dosis, el catalizador y la oxigenación, así como interacciones significativas dosis $\times$ catalizador y catalizador $\times$ oxigenación ($p < 0,05$). Ello indica que la respuesta temporal del sistema no dependió únicamente de los efectos individuales de los factores, sino también de la forma en que estos actuaron en combinación. El coeficiente de variación fue de 22,13 %, reflejando una mayor dispersión experimental para esta variable con respecto al voltaje y la densidad de corriente.

Tabla 10
ANOVA factorial para tiempo

Fuente	gl	SC	MS	F	p
Dosis (A)	1	342,770	342,770	37,192	<0,001
Catalizador (B)	1	1 612,120	1 612,120	174,922	<0,001
Oxigenación (C)	1	422,520	422,520	45,845	<0,001
AB	1	64,354	64,354	6,983	0,018
AC	1	3,604	3,604	0,391	0,541
BC	1	57,970	57,970	6,290	0,023
ABC	1	5,320	5,320	0,577	0,458
Error	16	147,460	9,216		

CV = 22,13%

En promedio, el tiempo disminuyó con mayor dosis, con catalizador y con oxigenación. Sin embargo, como hubo interacciones significativas, estas diferencias deben entenderse como tendencias generales y no como efectos completamente independientes.

Tabla 11
Medias de los factores para tiempo

Factor	Nivel	Media	DE
Dosis	10	17,5000	11,8187
Dosis	20	9,9417	8,4037
Catalizador	Con	5,5250	4,0629
Catalizador	Sin	21,9167	8,8545
Oxigenación	Con	9,5250	8,3513
Oxigenación	Sin	17,9167	11,5460

El efecto reductor del tiempo debido al catalizador fue evidente en ambas dosis, pero fue más fuerte cuando se trabajó con 20 g/L. Esto indicó que el beneficio del carbón activado se potencia a dosis alta.

Tabla 12*Interacción significativa Dosis × Catalizador para tiempo*

Dosis	Cat	Media	DE
10	Con	7,6667	4,4907
10	Sin	27,3333	7,4207
20	Con	3,3833	2,2675
20	Sin	16,5000	6,8557

La menor media de tiempo se observó cuando coincidieron catalizador y oxigenación. En ausencia de catalizador, aun con oxigenación, el tiempo permaneció relativamente alto; esto sugiere que la oxigenación sola no compensa completamente la falta de carbón activado.

Tabla 13*Interacción significativa Catalizador × Oxigenación para tiempo*

Cat	O2	Media	DE
Con	Con	2,8833	1,8713
Con	Sin	8,1667	4,0083
Sin	Con	16,1667	6,6383
Sin	Sin	27,6667	7,0048

Con respecto a los tratamientos, T8 presentó el menor tiempo promedio y se ubicó en el grupo inferior, mientras que T1 mostró el mayor tiempo. T4 y T7 no difirieron de T8, aunque numéricamente fueron mayores; T2 y T5 formaron un grupo intermedio alto. En términos experimentales, la combinación dosis alta + catalizador + oxigenación fue la que redujo más el tiempo.

Tabla 14*Tukey y medias por tratamiento para tiempo*

Tratamiento	Dosis	Cat	O₂	Media ± DE	Significancia
T8	20	Con	Con	1,60 ± 0,85	d
T4	10	Con	Con	4,17 ± 1,76	cd
T7	20	Con	Sin	5,17 ± 1,61	cd
T6	20	Sin	Con	10,67 ± 1,76	c
T3	10	Con	Sin	11,17 ± 3,25	c
T2	10	Sin	Con	21,67 ± 4,04	b
T5	20	Sin	Sin	22,33 ± 3,51	b
T1	10	Sin	Sin	33,00 ± 5,00	a

La dosis, el catalizador y la oxigenación afectaron significativamente el voltaje máximo y la densidad de corriente, sin interacciones significativas, por lo que sus efectos fueron consistentes y acumulativos. Para tiempo, además de los efectos principales, existieron interacciones dosis × catalizador y catalizador × oxigenación, indicando que la reducción del tiempo dependió de la combinación de factores. En conjunto, T8 (20 g/L, con catalizador y con oxigenación) fue el tratamiento con mejor desempeño eléctrico global, al presentar el mayor voltaje, la mayor densidad de corriente y el menor tiempo promedio.

5.1.3 Evaluación del desempeño eléctrico de una biocelda galvánica en función de la energía generada y del tiempo de operación empleando el almidón de cáscara de plátano (*Musa paradisiaca*)

Con base en los resultados del análisis factorial, se seleccionó el tratamiento T8 (20 g/L de almidón, con catalizador y con oxigenación) por presentar el mejor desempeño eléctrico global. A partir de esta configuración se evaluó el comportamiento temporal de la biocelda galvánica durante 24 horas continuas de operación, registrándose valores de voltaje y densidad de corriente a intervalos de 1 minuto. A partir de estos datos se calcularon la corriente, la potencia instantánea y la energía acumulada del sistema.

En la Figura 4 se muestra la variación del voltaje en función del tiempo durante el periodo de evaluación. Se observa una disminución gradual del potencial eléctrico, desde un valor inicial de 0,4272 V hasta un valor final de 0,3274 V. Aunque se registraron oscilaciones menores a lo largo del ensayo, la tendencia general fue descendente, lo que evidencia una pérdida progresiva del potencial eléctrico sin interrupción abrupta del funcionamiento del sistema.

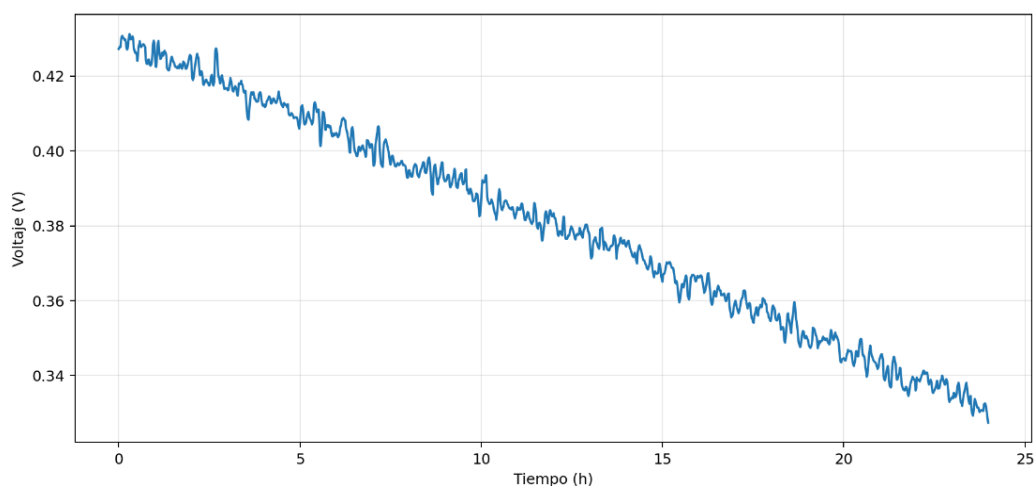


Figura 4

Voltaje en función del tiempo durante 24 h – T8

En la Figura 5 se presenta la densidad de corriente en función del tiempo. Esta variable mostró un comportamiento similar al observado para el voltaje, con una reducción progresiva desde 1,3637 mA/cm² al inicio del ensayo hasta 1,0450 mA/cm² al final. Este comportamiento indica una disminución gradual en la capacidad de transferencia de carga de la biocelda conforme avanzó el tiempo de operación.

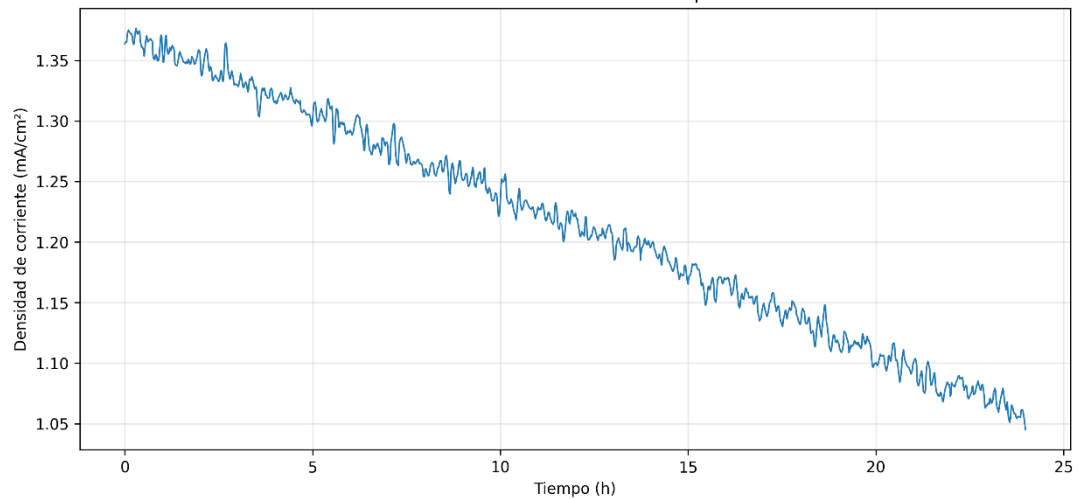


Figura 5

Densidad de corriente en función del tiempo durante 24 h – T8

En la Figura 6 se presenta la potencia instantánea calculada a partir de los valores medidos de voltaje y densidad de corriente. La potencia mostró una tendencia descendente a lo largo del ensayo, con un valor inicial de 29,51 mW y un valor final de 17,33 mW. Esta disminución refleja la reducción progresiva del rendimiento energético instantáneo del sistema durante el periodo de operación.

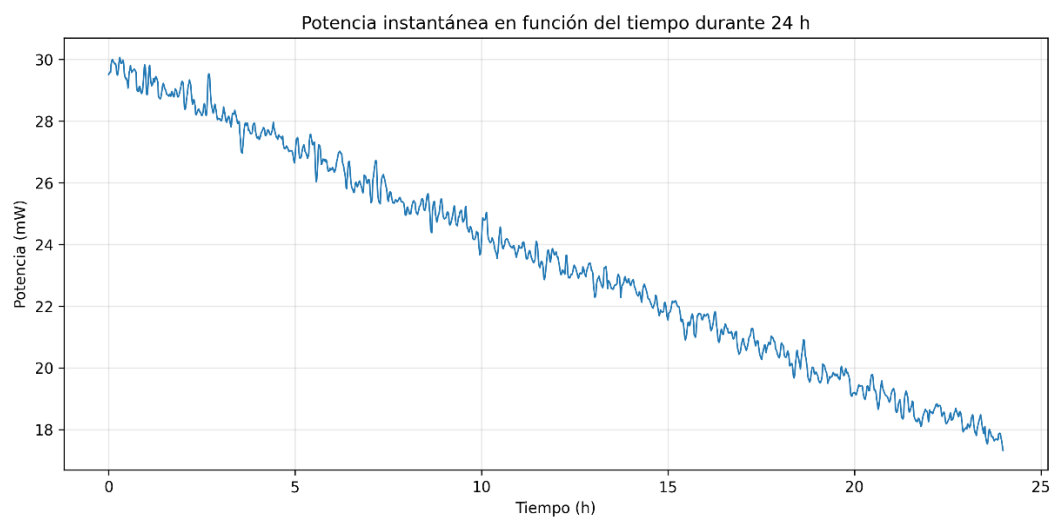


Figura 6

Potencia instantánea en función del tiempo durante 24 h – T8

La Figura 7 muestra la evolución de la energía acumulada obtenida mediante integración numérica de la curva potencia-tiempo por el método trapezoidal. La tendencia ascendente de la curva confirma que la biocelda mantuvo producción de energía durante todo el ensayo. No obstante, la pendiente de acumulación tendió a disminuir progresivamente hacia las últimas horas, en concordancia con el descenso observado en el voltaje, la densidad de corriente y la potencia instantánea.

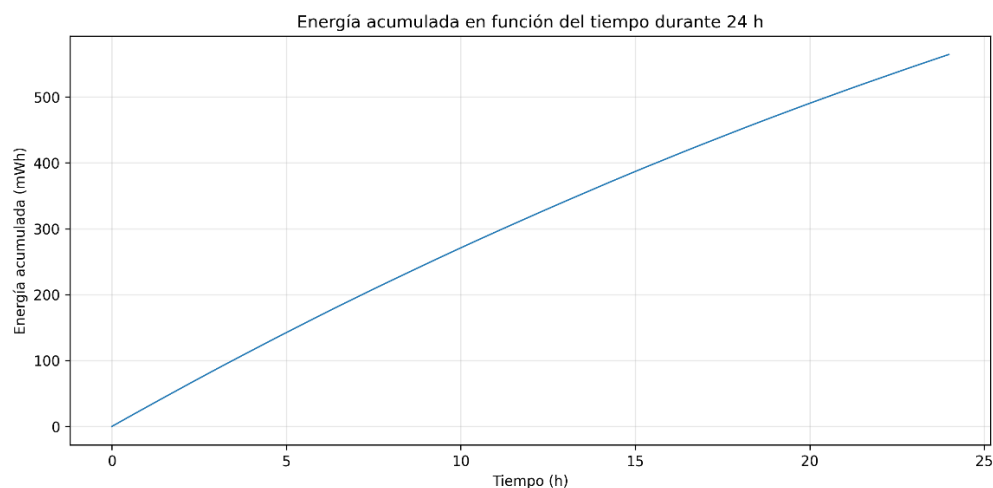


Figura 7

Energía acumulada en función del tiempo durante 24 h – T8

Los principales parámetros de desempeño eléctrico obtenidos durante las 24 horas de operación continua del tratamiento T8 se resumen en la Tabla 15. En términos generales, el sistema registró un voltaje promedio de 0,3804 V, una densidad de corriente promedio de 1,2145 mA/cm² y una potencia promedio de 23,53 mW. La energía total acumulada fue de 564,45 mWh, equivalente a 11,14 mWh/cm², lo que evidencia que la biocelda mantuvo generación eléctrica sostenida durante todo el periodo evaluado. Asimismo, la retención final de voltaje y de densidad de corriente fue de 76,63 %, mientras que la retención de potencia fue de 58,72 %, confirmando un decaimiento gradual del desempeño eléctrico a lo largo del tiempo, aunque con estabilidad operativa durante todo el ensayo.

Tabla 15

Parámetros de desempeño eléctrico de la biocelda galvánica durante 24 h de operación continua bajo el tratamiento óptimo T8

Indicador	Valor
Área efectiva del electrodo	50,65 cm ²
Intervalo de registro	1 min
Número de datos	1 440
Voltaje inicial	0,4272 V
Voltaje final	0,3274 V
Voltaje promedio	0,3804 V
Voltaje máximo	0,4312 V
Voltaje mínimo	0,3274 V
Retención de voltaje	76,63 %
Densidad de corriente inicial	1,3637 mA/cm ²
Densidad de corriente final	1,0450 mA/cm ²
Densidad de corriente promedio	1,2145 mA/cm ²
Densidad de corriente máxima	1,3765 mA/cm ²
Densidad de corriente mínima	1,0450 mA/cm ²
Retención de densidad de corriente	76,63 %
Corriente inicial	69,07 mA
Corriente final	52,93 mA
Corriente promedio	61,51 mA
Potencia inicial	29,51 mW
Potencia final	17,33 mW
Potencia promedio	23,53 mW
Potencia máxima	30,06 mW
Potencia mínima	17,33 mW
Retención de potencia	58,72 %
Energía total generada	564,45 mWh
Energía del áreal	11,14 mWh/cm ²
Pendiente del voltaje	-0,00413 V/h
Pendiente de la densidad de corriente	-0,01319 mA/cm ² ·h
Pendiente de la potencia	-0,50834 mW/h

Nota. La corriente se calculó a partir de la densidad de corriente medida y el área efectiva del electrodo ($I = J \times A$), considerando un área de 50,65 cm². La potencia instantánea se determinó mediante $P = V \times I$, y la energía total generada se estimó por integración numérica de la curva potencia-tiempo usando el método trapezoidal.

5.2 Discusión de resultados

5.2.1 Análisis de las características fisicoquímicas de la cáscara de plátano (*Musa paradisiaca*) y su contenido de almidón

La humedad de la cáscara de plátano alcanzó $78,4 \pm 2,1$ %, valor que resultó significativamente diferente del referente bibliográfico empleado en el contraste estadístico. Sin embargo, esta diferencia no debe interpretarse como una desviación atípica, sino como una expresión de la variabilidad natural del residuo, ya que el contenido de agua en la cáscara depende del cultivar, del grado de madurez y de las condiciones poscosecha. En este sentido, Vasundhara et al. (2021) reportaron para distintos cultivares de plátano contenidos de humedad entre 73 y 86 %, mientras que en algunas variedades se observaron valores entre 78,74 y 87,33 %. Por tanto, el valor obtenido en esta investigación se ubica dentro del intervalo esperado para cáscara fresca de plátano y confirma el carácter altamente hidratado y perecible de esta biomasa, condición que resulta coherente con su naturaleza como residuo agroindustrial fresco. (Vasundhara et al., 2021).

El contenido de cenizas fue de $8,2 \pm 0,9$ %, presentando diferencia significativa respecto al valor referencial seleccionado. No obstante, este resultado conserva consistencia con lo descrito en otras investigaciones

sobre *Musa paradisiaca*. Anorue et al. (2023) informaron contenidos de cenizas entre 7,55 % y 10,76 % para cáscara de plátano, mientras que revisiones recientes destacan que este subproducto presenta una fracción mineral relevante, asociada principalmente a la presencia de potasio, calcio, magnesio y fósforo (Bishnoi et al., 2023; Yasin et al., 2025). En consecuencia, el valor hallado en el presente estudio no solo se encuentra dentro del rango bibliográfico, sino que además refuerza el potencial de la cáscara como matriz rica en componentes inorgánicos, aspecto que puede influir en su comportamiento funcional y en su aprovechamiento tecnológico. (Anorue et al., 2023; Bishnoi et al., 2023; Yasin et al., 2025).

En el almidón extraído, el pH de $6,31 \pm 0,3$ no presentó diferencia significativa respecto al valor referencial considerado, lo que indica un comportamiento químico estable dentro del intervalo esperado para matrices derivadas de cáscara de plátano. Este resultado coincide con los valores reportados por Mohd Dom et al. (2021) para polvo de cáscara de plátano, cuyo pH osciló entre 6,15 y 6,46, aunque fue inferior al pH 7,49 descrito por Ezech et al. (2017) para almidón aislado de cáscara de plátano inmaduro. Esta diferencia frente a otros estudios puede atribuirse al origen del material, al estado de madurez y, sobre todo, al procedimiento de extracción y purificación del almidón. Aun así, el valor obtenido en esta

investigación se mantiene dentro de un rango moderadamente ácido a cercano a neutro, lo que indica que el almidón extraído conservó una condición fisicoquímica compatible con su posterior evaluación experimental.

La temperatura de gelatinización del almidón fue de $69,2 \pm 1,8$ °C, sin diferencia significativa respecto al valor referencial adoptado, lo que constituye un resultado particularmente relevante, ya que confirma que el almidón obtenido presentó un comportamiento térmico acorde con lo reportado para almidones de cáscara de plátano. Li et al. (2018) indicaron que el almidón de cáscara de banana verde presenta una transición térmica con temperatura de inicio cercana a 68 °C y temperatura pico alrededor de 71,6 °C, mientras que Cortés-Pérez et al. (2021) reportaron un valor promedio de 72,6 °C para almidón nativo de cáscara de plátano (*Musa paradisiaca*). De este modo, el valor obtenido en la presente investigación se inserta dentro del intervalo térmico descrito para esta matriz, lo que sugiere que el almidón extraído conservó una estructura granular y un nivel de organización molecular propios de un material funcionalmente aprovechable. Este hallazgo es importante porque respalda la idoneidad del almidón aislado como material de estudio en el sistema de biocelda galvánica evaluado. (Li et al., 2018; Cortés-Pérez et al., 2021).

En conjunto, los resultados muestran que, aunque algunos parámetros difirieron estadísticamente de los referentes seleccionados, todos se mantuvieron dentro de la variabilidad descrita para la cáscara de plátano y su almidón. Desde esta perspectiva, la materia prima analizada no solo presentó características comparables con las reportadas en otras investigaciones, sino que además exhibió atributos fisicoquímicos que respaldan su aprovechamiento experimental.

5.2.2 Determinación de la dosis y las condiciones operativas óptimas del sistema de biocelda galvánica para la generación de energía eléctrica a partir de almidón de cáscara de plátano (*Musa paradisiaca*)

Los resultados obtenidos evidenciaron que la dosis de almidón, la presencia de carbón activado y la oxigenación del cátodo influyeron significativamente sobre el voltaje máximo y la densidad de corriente del sistema. La ausencia de interacciones significativas para ambas variables indicó que, dentro del rango experimental evaluado, los efectos de los tres factores fueron esencialmente aditivos, es decir, cada factor contribuyó al incremento de la respuesta eléctrica sin depender estadísticamente del nivel de los otros. Este comportamiento constituye un hallazgo relevante, ya que muestra que la mejora del sistema no respondió a una condición

aislada, sino a la contribución simultánea y consistente de la mayor dosis de almidón, la presencia del catalizador y la disponibilidad de oxígeno en el cátodo. En términos experimentales, ello se reflejó en coeficientes de variación bajos para voltaje máximo (2,62 %) y densidad de corriente (1,92 %), lo que respalda la precisión del ensayo y otorga solidez a la tendencia observada.

El efecto favorable de la dosis de 20 g/L sugiere que, en las condiciones de esta investigación, una mayor concentración de almidón mejoró el comportamiento del medio electrolítico, probablemente al favorecer una matriz más continua y con mayor disponibilidad de especies iónicas móviles. Esta interpretación es coherente con lo descrito para materiales amiláceos y electrolitos poliméricos de base natural, en los que el almidón puede actuar como una matriz funcional capaz de retener agua, facilitar interacciones iónicas y contribuir al transporte de carga cuando su formulación y estado físico son adecuados (Hernandez-Jaimes et al., 2015; Chen et al., 2023; Rehman et al., 2025). En este contexto, el incremento del voltaje promedio de 0,2898 a 0,3862 V y de la densidad de corriente de 0,9196 a 1,2221 mA/cm² al pasar de 10 a 20 g/L indica que el rango evaluado aún se encontraba en una zona de respuesta favorable, sin

evidencias de saturación electroquímica o de un incremento de resistencia interna por exceso de sólidos.

Estos resultados guardan concordancia parcial con investigaciones previas que han demostrado que la composición y concentración del sustrato o matriz amilácea modifican el desempeño eléctrico de sistemas bioelectroquímicos y galvánicos. Farje et al. (2017), al trabajar con almidón y HCl, reportaron un máximo de 214 mV, valor inferior al alcanzado en el presente estudio para el tratamiento óptimo. De manera similar, López & Puente (2017) obtuvieron valores de 364 a 374 mV en bioceldas de almidón con extracto de nabo y ácido tungsteno fosfórico, también por debajo del valor promedio de T8 ($0,4230 \pm 0,0072$ V). Aunque las configuraciones experimentales no son estrictamente equivalentes, la comparación permite sostener que el sistema evaluado con almidón de cáscara de plátano presentó un desempeño competitivo dentro del conjunto de investigaciones nacionales sobre bioceldas de almidón. Por otro lado, Carrasco & Benites (2017) registraron 0,80 V al emplear biomasa de cáscara de papa y aguas residuales; sin embargo, esa diferencia debe interpretarse considerando que se trató de otra matriz orgánica, otro volumen de operación y otra configuración experimental, por lo que no constituye una comparación directa, sino referencial.

La influencia positiva del carbón activado confirma que el comportamiento del cátodo fue determinante en el rendimiento global de la biocelda. Este comportamiento resulta coherente con lo reportado en la literatura electroquímica, donde la naturaleza superficial del electrodo y la disponibilidad de sitios activos modifican directamente la transferencia de carga y la magnitud de las pérdidas por activación (Chandler et al., 2015; Biesheuvel et al., 2009). De manera complementaria, Ismail et al. (2020) demostraron que la incorporación de materiales amiláceos en sistemas electroquímicos con zinc puede mejorar la conductividad y el desempeño del conjunto, lo que refuerza la idea de que la matriz del sistema y la superficie electroactiva no actúan de forma independiente, sino de manera integrada.

La oxigenación también ejerció un efecto significativo y positivo sobre el voltaje máximo y la densidad de corriente, lo que indica que la disponibilidad de oxígeno en la cámara catódica favoreció la reacción de reducción y disminuyó las limitaciones por transferencia de masa. Este resultado es especialmente consistente con lo señalado por Chandler et al. (2015) para sistemas galvánicos Zn–Cu, donde el desempeño del cátodo depende en gran medida de la disponibilidad de oxígeno disuelto y de las restricciones difusionales del medio.

En cuanto al tiempo transcurrido hasta alcanzar el voltaje máximo, la interpretación fue más compleja, debido a que además de los efectos principales se identificaron interacciones significativas dosis $\times$ catalizador y catalizador $\times$ oxigenación. Este resultado indica que la rapidez de respuesta del sistema dependió de la combinación de factores y no solo de sus efectos individuales.

El hecho de que el efecto reductor del tiempo por acción del carbón activado fuera más marcado a 20 g/L demuestra que el beneficio del catalizador se intensificó cuando el sistema dispuso simultáneamente de una matriz electrolítica más favorable. De forma similar, la interacción catalizador $\times$ oxigenación mostró que la aireación fue mucho más eficaz en presencia de carbón activado que en su ausencia, lo cual evidencia una respuesta sinérgica en la zona catódica. En términos electroquímicos, ello sugiere que la oxigenación por sí sola no fue suficiente para compensar una interfase menos activa, mientras que la combinación de oxígeno disponible y superficie catalítica sí aceleró de forma marcada el establecimiento del máximo rendimiento.

Este comportamiento temporal aporta un elemento adicional de valor a los resultados, porque no solo se obtuvo un mayor rendimiento final, sino

también una respuesta más rápida del sistema. Desde el punto de vista aplicado, alcanzar el voltaje máximo en menor tiempo implica una activación electroquímica más eficiente y una menor latencia operativa, lo que fortalece la conveniencia del tratamiento T8 como condición óptima.

5.2.3 Evaluación del desempeño eléctrico de una biocelda galvánica en función de la energía generada y del tiempo de operación empleando el almidón de cáscara de plátano (*Musa paradisiaca*)

El comportamiento temporal del sistema mostró una disminución gradual del voltaje, de la densidad de corriente y de la potencia instantánea, pero sin presentar una caída abrupta ni interrupción del proceso electroquímico. Este patrón indica que el almidón de cáscara de plátano, en la configuración seleccionada, no solo permitió la generación inicial de electricidad, sino también la conservación de una respuesta eléctrica funcional a lo largo del tiempo. En términos electroquímicos, ello sugiere que la matriz evaluada mantuvo condiciones adecuadas de transporte iónico y continuidad de las reacciones redox durante todo el ensayo.

La reducción progresiva del voltaje y de la densidad de corriente conforme avanzó el tiempo de operación constituye un comportamiento esperable en sistemas galvánicos y bioelectroquímicos. Este fenómeno

puede explicarse por la disminución gradual de la disponibilidad de especies electroactivas, el incremento de la resistencia interna efectiva del sistema y la aparición de pérdidas por polarización, tanto óhmica como de concentración, a medida que el proceso de descarga se prolonga (Biesheuvel et al., 2009; Chandler et al., 2015). En ese sentido, el descenso observado no representa una falla del sistema, sino una respuesta coherente con la evolución temporal de una celda en operación continua. Desde esta perspectiva, resulta relevante que, a pesar de dicha disminución, la biocelda conservara al final del ensayo el 76,63 % del voltaje y de la densidad de corriente iniciales, lo que demuestra una estabilidad operativa apreciable para una matriz electrolítica de origen biológico.

El comportamiento de la potencia instantánea fue consistente con la evolución simultánea del voltaje y de la corriente. Su disminución más marcada, con una retención final de 58,72 %, es técnicamente razonable, debido a que la potencia depende del producto de ambas variables; por tanto, pequeñas reducciones acumuladas en voltaje y corriente se traducen en una caída proporcionalmente mayor de la potencia útil. Este resultado no debilita el desempeño del sistema, sino que permite identificar con mayor claridad la sensibilidad del rendimiento energético instantáneo frente al tiempo de operación. En consecuencia, el patrón obtenido confirma que

el sistema presentó un proceso de descarga gradual y predecible, rasgo que resulta más favorable que una generación errática o inestable.

La energía acumulada alcanzada durante las 24 horas, equivalente a 564,45 mWh o 11,14 mWh/cm². A diferencia del voltaje o de la potencia instantánea, que reflejan estados puntuales del sistema, la energía acumulada expresa el rendimiento global de la biocelda durante todo el periodo evaluado. El hecho de que la curva de energía continuara aumentando durante las 24 horas confirma que el dispositivo siguió generando electricidad de forma sostenida, aun cuando la pendiente de acumulación se redujo progresivamente. Esto coincide con el criterio metodológico empleado en estudios bioelectroquímicos, donde la integración del área bajo la curva potencia-tiempo permite valorar con mayor precisión la estabilidad y la eficiencia global del sistema en operación prolongada (Kim et al., 2008; Santoro et al., 2017).

Desde una perspectiva comparativa, el comportamiento observado en esta investigación resulta consistente con lo reportado en otros sistemas que emplean sustratos amiláceos o matrices orgánicas para generación eléctrica. Farje et al. (2017) reportaron un máximo de 214 mV en un sistema basado en almidón con HCl, valor inferior al registrado en la presente

investigación, donde el tratamiento óptimo alcanzó valores iniciales superiores a 0,42 V y un promedio de 0,3804 V durante 24 horas. De igual manera, López & Puente (2017) obtuvieron valores de 364 a 374 mV en bioceldas de almidón de papa con extracto de nabo y ácido tungsteno fosfórico, rango que resulta cercano, pero ligeramente inferior, al desempeño promedio aquí alcanzado. Estas comparaciones indican que el almidón de cáscara de plátano mostró una respuesta electroquímica competitiva frente a otros sustratos amiláceos evaluados experimentalmente, lo cual refuerza su potencial como material funcional dentro de bioceldas galvánicas de base orgánica.

Asimismo, Alayo & Baca (2016) registraron en bioceldas de almidón densidades de corriente del orden de microamperios por centímetro cuadrado y voltajes mayores cuando se emplearon arreglos en serie. Aunque dichas condiciones no son directamente comparables con las del presente estudio, debido a diferencias de escala, configuración eléctrica y geometría de electrodos, sus resultados permiten ubicar el comportamiento aquí observado dentro de una línea de investigación orientada a optimizar materiales amiláceos para conversión de energía. En ese marco, la densidad de corriente promedio obtenida en esta investigación, del orden de miliamperios por centímetro cuadrado, evidencia que la formulación

evaluada presentó una respuesta eléctrica sostenida y de magnitud experimentalmente relevante. Del mismo modo, Carrasco & Benites (2017), al emplear biomasa de cáscara de papa y aguas residuales, demostraron la factibilidad de reaprovechar residuos orgánicos en bioceldas para generar electricidad, lo que coincide con el enfoque de valorización energética de subproductos que sustenta este estudio.

CONCLUSIONES

Se concluye que el uso del almidón de cáscara de plátano (*Musa paradisiaca*) sí permitió generar energía eléctrica en bioceldas galvánicas bajo condiciones controladas de laboratorio. Su influencia se evidenció tanto en la respuesta eléctrica inicial como en el desempeño temporal del sistema, siendo más favorable cuando se empleó una dosis de 20 g/L, carbón activado como catalizador y oxigenación del cátodo. En consecuencia, el almidón de cáscara de plátano constituye una materia prima viable para aplicaciones experimentales de generación electroquímica de baja potencia y representa una alternativa de valorización de residuos orgánicos con interés científico y tecnológico.

La caracterización fisicoquímica confirmó que la cáscara de plátano (*Musa paradisiaca*) utilizada en la investigación presentó condiciones adecuadas para su aprovechamiento experimental como fuente de almidón. Se determinó un contenido de almidón de $7,1 \pm 1,4$ % en base húmeda, equivalente a 32,9 % en base seca, además de una humedad de $78,4 \pm 2,1$ %, cenizas de $8,2 \pm 0,9$ %, pH del almidón extraído de $6,31 \pm 0,3$ y temperatura de gelatinización de $69,2 \pm 1,8$ °C. En conjunto, estos resultados evidencian que la biomasa evaluada posee una fracción

amilácea aprovechable y propiedades fisicoquímicas compatibles con su empleo en sistemas bioelectroquímicos de baja escala.

La dosis de almidón, la presencia de carbón activado y la oxigenación del cátodo influyeron significativamente en el comportamiento eléctrico de la biocelda galvánica. El tratamiento T8 (20 g/L de almidón, con catalizador y con oxigenación) presentó el mejor desempeño global, al alcanzar el mayor voltaje máximo promedio ($0,4230 \pm 0,0072$ V), la mayor densidad de corriente ($1,3503 \pm 0,0183$ mA/cm²) y el menor tiempo para alcanzar el máximo voltaje ($1,60 \pm 0,85$ min). Por tanto, se determinó que la combinación de mayor dosis de almidón con catalizador y oxigenación constituye la condición operativa más favorable dentro del intervalo experimental evaluado.

El tratamiento óptimo T8 mostró generación eléctrica sostenida durante 24 horas continuas de operación, con descenso gradual, pero sin pérdida abrupta de funcionalidad. Durante este periodo, el sistema registró un voltaje promedio de 0,3804 V, una densidad de corriente promedio de 1,2145 mA/cm², una potencia promedio de 23,53 mW y una energía total acumulada de 564,45 mWh, equivalente a 11,14 mWh/cm². Asimismo, la retención final de voltaje y de densidad de corriente fue de 76,63 %,

mientras que la retención de potencia fue de 58,72 %, lo que confirma una operación estable con decaimiento progresivo del rendimiento.

RECOMENDACIONES

Se recomienda que futuras investigaciones profundicen la caracterización de la materia prima incorporando variables como conductividad iónica, contenido de azúcares reductores, amilosa/amilopectina y composición mineral del extracto, así como un mejor control del estado de madurez del fruto y de las condiciones postcosecha, a fin de reducir la variabilidad de la biomasa y mejorar la interpretación del comportamiento electroquímico.

Se recomienda ampliar el rango experimental de dosis y optimizar de manera independiente el sistema catódico, evaluando diferentes masas o métodos de fijación del carbón activado, así como distintos niveles de aireación. Del mismo modo, conviene estandarizar el puente salino o separador iónico con materiales de mayor reproducibilidad, con el fin de disminuir la resistencia interna y mejorar la estabilidad operativa de la biocelda.

Se recomienda realizar ensayos de operación durante periodos más prolongados y bajo recambio o reposición controlada del sustrato, con el propósito de evaluar la durabilidad real del sistema, la cinética de

decaimiento y la posibilidad de sostener la generación eléctrica por tiempos mayores. Asimismo, sería pertinente comparar el almidón purificado con extractos húmedos de cáscara de plátano, a fin de determinar si matrices menos refinadas pueden mantener o mejorar el desempeño eléctrico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ai, Y., & Jane, J. (2015). Gelatinization and rheological properties of starch. *Starch/Stärke*, 67(3–4), 213–224. <https://doi.org/10.1002/star.201400201>
- Alayo Villanueva, Z. G., & Baca Amasifuen, L. S. (2016). Influencia de la densidad de corriente para incrementar la generación de energía en bioceldas de almidón [Tesis de título profesional, Universidad Nacional de Trujillo]. Repositorio Institucional UNT. http://dspace.unitru.edu.pe/bitstream/handle/UNITRU/9866/AlayoVillanueva_Z%20-%20BacaAmasifuen_L.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Alcázar-Alay, S. C., & Meireles, M. A. A. (2015). Physicochemical properties, modifications and applications of starches from different botanical sources. *Food Science and Technology*, 35(2), 215–236. <https://doi.org/10.1590/1678-457X.6749>
- Alipour, M., Ziebert, C., Conte, F. V., & Kizilel, R. (2020). A review on temperature-dependent electrochemical properties, aging, and performance of lithium-ion cells. *Batteries*, 6(3), 35. <https://doi.org/10.3390/batteries6030035>

- Amrulloh, H., Simanjuntak, W., Situmeang, R., Sagala, S. L., Bramawanto, R., & Nahrowi, R. (2019). Effect of dilution and electrolysis time on recovery of Mg^{2+} as $Mg(OH)_2$ from bittern by electrochemical method. *Journal of Pure and Applied Chemistry Research*, 8(2), 60–67.
- Anorue, D. N., & John, A. O. (2023). Comparative analysis on the proximate and mineral compositions of *Musa paradisiaca* peels, stems and leaves. *Sarcouncil Journal of Plant and Agronomy*, 1(2), 1–5.
- Apriyanto, A., Compart, J., & Fettke, J. (2022). A review of starch, a unique biopolymer – Structure, metabolism and in planta modifications. *Plant Science*, 318, 111223. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2022.111223>
- Bertoft, E. (2017). Understanding starch structure: Recent progress. *Agronomy*, 7(3), 56. <https://doi.org/10.3390/agronomy7030056>
- Biesheuvel, P. M., van Soestbergen, M., & Bazant, M. Z. (2009). Imposed currents in galvanic cells. *Electrochimica Acta*, 54(21), 4857–4871. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2009.03.068>
- Bishnoi, S., Sharma, S., & Agrawal, H. (2023). Exploration of the potential application of banana peel for its effective valorization: A review. *Indian Journal of Microbiology*, 63(4), 398–409. <https://doi.org/10.1007/s12088-023-01100-w>

Carrasco Vergara, A. L., & Benites Alfaro, E. (2017). Generación de energía eléctrica mediante el reaprovechamiento de biomasa (cáscara de papa y aguas residuales) por medio de bioceldas. *Revista ECIPerú*, 14(2), 93-99.

<https://revistas.eciperu.net/index.php/ECIPERU/article/view/103/101>

Chakraborty, I., N, P., Mal, S. S., Paul, U. C., & Mazumder, N. (2022). An insight into the gelatinization properties influencing the modified starches used in food industry: A review. *Food and Bioprocess Technology*, 15, 1195–1223. <https://doi.org/10.1007/s11947-022-02761-z>

Chandler, J. H., Culmer, P. R., Jayne, D. G., & Neville, A. (2015). Assessment of electrochemical properties of a biogalvanic system for harvesting electrical energy from biological fluids. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 48(28), 285401. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/48/28/285401>

Chen, L., Wang, J., Huang, J., Tu, T., & Li, L. (2023). Cost-trivial material contributes greatly: A review of the applications of starch in electrochemical devices. *International Journal of Biological Macromolecules*, 253, 127336. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.127336>

- Cheng, S., & Wu, J. (2013). Air-cathode preparation with activated carbon as catalyst, PTFE as binder and nickel foam as current collector for microbial fuel cells. *Bioelectrochemistry*, 92, 22–26.
<https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2013.03.001>
- Chiaoprakobkij, N., Okhawilai, M., Kasemsiri, P., & Uyama, H. (2024). Biopolymer electrolyte from banana powder-konjac glucomannan incorporated with sodium hydroxide. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 683, 132763.
<https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2024.132763>
- Choudhury, N. A., Sampath, S., & Shukla, A. K. (2008). Gelatin hydrogel electrolytes and their application to electrochemical supercapacitors. *Journal of The Electrochemical Society*, 155(1), A74–A81.
<https://doi.org/10.1149/1.2803989>
- Cordenunsi-Lysenko, B. R., Nascimento, J. R. O., Castro-Alves, V. C., Purgatto, E., Fabi, J. P., & Peroni-Okyta, F. H. G. (2019). The starch is (not) just another brick in the wall: The primary metabolism of sugars during banana ripening. *Frontiers in Plant Science*, 10, 391.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00391>.
- Correa G, D., Castaño, M., & Montoya L, J. (2017). Influencia del método de extracción en las propiedades funcionales de almidón de plátano

dominico hartón (*Musa paradisiaca* L.). *UGCiencia*, 23, 88-91.
<https://doi.org/10.18634/ugcj.23v.0i.792>

Cortés-Pérez, C., Pérez-Montalvo, L., Puello-Silva, J. R., Pasqualino, J., & Lambis-Miranda, H. A. (2021). Synthesis and characterization of a coagulating agent from plantain peel starch (*Musa paradisiaca*), as adjuvant in water treatment [Preprint]. Research Square.
<https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-686997/v1>

Ember. (2025). Global electricity review 2025. <https://ember-energy.org/app/uploads/2025/04/Report-Global-Electricity-Review-2025.pdf>

Ezeh, V. O., Obidiegwu, M. U., Uzoma, P. C., & Obasi, H. C. (2017). Isolation and characterization of starch from unripe plantain (*Musa paradisiaca*) peels. *World Journal of Applied Chemistry*, 2(3), 109–115.
<https://doi.org/10.11648/j.wjac.20170203.16>.

Farje Ocampo, E., Vargas Escalante, F., & Aguilar Quiroz, C. (2017). Obtención de energía eléctrica a partir del almidón: Influencia del HCl, temperatura y sustrato. *Tecnia*, 19(2).
<http://revistas.uni.edu.pe/index.php/tecnia/article/view/114>

Fauzi, A. F. M., Zainal Abidin, M., & Zulhilmi Cheng, M. Z. S. (2025). Physicochemical properties of banana peel starch and their potential application: A review. *Journal of Agriculture and Food Research*, 19, 101646. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101646>

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2023). Crops and livestock products. FAOSTAT. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>

Fu, Z., Chen, J., Luo, S.-J., Liu, C.-M., & Liu, W. (2015). Effect of food additives on starch retrogradation: A review. *Starch/Stärke*, 67(1–2), 69–78. <https://doi.org/10.1002/star.201400169>

Ge, Z., & He, Z. (2015). An effective dipping method for coating activated carbon catalyst on the cathode electrodes of microbial fuel cells. *RSC Advances*, 5(46), 36933–36937. <https://doi.org/10.1039/C5RA05543A>

Gobierno Regional de Tacna. (2023). Política Ambiental Regional (PAR) de Tacna al 2030. https://sinia.minam.gob.pe/sites/default/files/archivos/public/docs/PAR%202023%20%281%29_0.pdf

Grace, M. H. (1977). Thermal properties of starch. In *Starch: Chemistry and Technology* (Vol. 2). Academic Press.

- Gritzner, G., & Kreysa, G. (1993). Nomenclature, symbols and definitions in electrochemical engineering (IUPAC Recommendations 1993). *Pure and Applied Chemistry*, 65(5), 1009–1020. <https://doi.org/10.1351/pac199365051009>.
- Hadisoewignyo, L., Foe, K., & Tjandrawinata, R. R. (2017). Isolation and characterization of Agung banana peel starch from East Java Indonesia. *International Food Research Journal*, 24(3), 1324–1330.
- Hernández, J., García, R., Páramo, U., Silva, R., & García, L. (2013). Síntesis química, estudios de caracterización y reactividad de un material catalítico a base de $\text{ZrO}_2\text{-H}_3\text{PW}_{12}\text{O}_{40}$. *Quimica Nova*. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422013000700003>
- Hernandez-Jaimes, C., Lobato-Calleros, C., Sosa, E., Bello-Pérez, L. A., Vernon-Carter, E. J., & Alvarez-Ramirez, J. (2015). Microstructure and viscoelastic properties of maize starch-candelilla wax oleogel composites. *Journal of Food Engineering*, 166, 79–87. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.05.024>
- Herrero-Hernández, E., Smith, T. J., & Akid, R. (2013). Electricity generation from wastewaters with starch as carbon source using a mediatorless microbial fuel cell. *Biosensors and Bioelectronics*, 39(1), 194–198. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2012.07.037>

Hikal, W. M., Said-Al Ahl, H. A. H., Bratovcic, A., Tkachenko, K. G., Sharifi-Rad, J., Kačániová, M., Elhourri, M., & Atanassova, M. (2022). Banana peels: A waste treasure for human being. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2022, 7616452. <https://doi.org/10.1155/2022/7616452>

Hoover, R. (2001). Composition, molecular structure, and physicochemical properties of tuber and root starches: A review. *Carbohydrate Polymers*, 45(3), 253–267. [https://doi.org/10.1016/S0144-8617\(00\)00260-5](https://doi.org/10.1016/S0144-8617(00)00260-5)

Ieropoulos, I., Greenman, J., & Melhuish, C. (2010). Improved energy output levels from small-scale microbial fuel cells. *Bioelectrochemistry*, 78(1), 44–50. <https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2009.10.005>

International Energy Agency. (2025). Electricity. In *Global energy review 2025*. <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2025/electricity>

International Renewable Energy Agency. (2020). *Recycle: Bioenergy*. IRENA. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Sep/CC_05_Recycle_bioenergy_2020.pdf

International Union of Pure and Applied Chemistry. (2025a). Catalyst. In IUPAC Compendium of Chemical Terminology (5th ed.). <https://doi.org/10.1351/goldbook.C00876>.

International Union of Pure and Applied Chemistry. (2025b). Electric current density. In IUPAC Compendium of Chemical Terminology (5th ed.). <https://doi.org/10.1351/goldbook.E01928>.

International Union of Pure and Applied Chemistry. (2025c). Anode. In IUPAC Compendium of Chemical Terminology (5th ed.). <https://doi.org/10.1351/goldbook.A00370>.

International Union of Pure and Applied Chemistry. (2025d). Cathode. In IUPAC Compendium of Chemical Terminology (5th ed.). <https://doi.org/10.1351/goldbook.C00905>.

International Union of Pure and Applied Chemistry. (2025e). Electrolyte. In IUPAC Compendium of Chemical Terminology (5th ed.). <https://doi.org/10.1351/goldbook.09061>.

International Union of Pure and Applied Chemistry. (2025f). Ionic conductivity. In IUPAC Compendium of Chemical Terminology (5th ed.). <https://doi.org/10.1351/goldbook.I03175>.

- Ismail, W., Chien, L., Adli, H., Salleh, H., & Marsi, M. (2020). Conductivity study of cassava starch coated anode for Zn–C battery application. *Materials Science Forum*, 1010, 301–307. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1010.301>
- Jalili, P., Ala, A., Nazari, P., Jalili, B., & Domiri Ganji, D. (2024). A comprehensive review of microbial fuel cells considering the membrane and transportation phenomena. *Scientific Reports*, 14, 23103. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-74428-0>
- Jayasinghe, N., Franks, A. E., Nevin, K. P., & Mahadevan, R. (2014). Metabolic modeling of spatial heterogeneity of biofilms in microbial fuel cells reveals substrate limitations in electrical current generation. *Biotechnology Journal*, 9(10), 1350–1361. <https://doi.org/10.1002/biot.201400068>
- Kim, J. R., Min, B., & Logan, B. E. (2005). Evaluation of procedures to acclimate a microbial fuel cell for electricity production. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 68(1), 23–30. <https://doi.org/10.1007/s00253-004-1845-6>
- Kumari, P., Gaur, S. S., & Tiwari, R. K. (2023). Banana and its by-products: A comprehensive review on nutritional composition and

pharmacological benefits. eFood, 4(5), e110.
<https://doi.org/10.1002/efd2.110>.

Li, Z., Guo, K., Lin, L., He, W., Zhang, L., & Wei, C. (2018). Comparison of physicochemical properties of starches from flesh and peel of green banana fruit. Molecules, 23(9), 2312.
<https://doi.org/10.3390/molecules23092312>

Lingappan, N., Lee, W., Passerini, S., & Pecht, M. (2023). A comprehensive review of separator membranes in lithium-ion batteries. Chemical Reviews, 123(7), 4804–4874.
<https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.2c00496>

Logan, B. E., Hamelers, B., Rozendal, R., Schröder, U., Keller, J., Freguia, S., Aelterman, P., Verstraete, W., & Rabaey, K. (2006). Microbial fuel cells: Methodology and technology. Environmental Science & Technology, 40(17), 5181–5192. <https://doi.org/10.1021/es0605016>

López Jara, L. A., & Puente Caipo, A. P. (2017). Influencia de la relación de extracción de nabo (*Brassica rapa*) / ácido tungsteno fosfórico para incrementar la producción de energía en bioceldas de almidón [Tesis de título profesional, Universidad Nacional de Trujillo]. Repositorio Institucional UNT.

http://dspace.unitru.edu.pe/bitstream/handle/UNITRU/8958/LopezJara_L%20-%20PuenteCaipo_A.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Ma, C., Xie, F., Wei, L., Zheng, C., Liu, X., Wang, L., & Liu, P. (2022). All-starch-based hydrogel for flexible electronic devices. *ACS Applied Polymer Materials*, 4(4), 2516–2525. <https://doi.org/10.1021/acsapm.1c01738>

Malo Mendez, S. M., & Varas Saldaña, Z. X. (2018). Influencia del peróxido de hidrógeno en la generación de energía eléctrica en bioceldas de almidón [Tesis de título profesional, Universidad Nacional de Trujillo]. Repositorio Institucional UNT. <http://dspace.unitru.edu.pe/bitstream/handle/UNITRU/11682/Malo%20Mendez%20y%20Varas%20Salda%C3%B1a.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Marta, H., Cahyana, Y., Djali, M., & Pramafisi, G. (2022). The properties, modification, and application of banana starch. *International Journal of Food Properties*, 25(1), 1070–1088. <https://doi.org/10.1080/10942912.2022.2066126>

Mendoza Villanueva, C. R., & Valverde Diaz, J. E. (2018). Influencia del tiempo y concentración del colorante marrón estrella en la generación de energía eléctrica de bioceldas de almidón [Tesis de título profesional,

Universidad Nacional de Trujillo]. Repositorio Institucional UNT.
[http://dspace.unitru.edu.pe/bitstream/handle/UNITRU/11574/Valverde
%20Diaz%20J.%20-
%20Mendoza%20Villanueva%20C.%20.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://dspace.unitru.edu.pe/bitstream/handle/UNITRU/11574/Valverde%20Diaz%20J.%20-%20Mendoza%20Villanueva%20C.%20.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Merino-Jiménez, I., Santoro, C., Rojas-Carbonell, S., Greenman, J., Ieropoulos, I., Atanassov, P., & Vargas, M. D. (2016). Carbon-based air-breathing cathodes for microbial fuel cells. *Catalysts*, 6(9), 127.
<https://doi.org/10.3390/catal6090127>

Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego. (2023). El agro en cifras 2023.
https://siea.midagri.gob.pe/portal/phocadownload/datos_estadisticas/mensual/Agro/2023/Agro_en_cifras_12_2023.pdf

Ministerio del Ambiente. (2023). PI2023: Indicadores del Compromiso 3.
<https://site.minam.gob.pe/pi2023>

Mohd Dom, Z., Mujianto, L., Azhar, A., Masaudin, S., & Samsudin, R. (2021). Physicochemical properties of banana peel powder in functional food products. *Food Research*, 5(Suppl. 1), 209–215.
[https://doi.org/10.26656/fr.2017.5\(S1\).037](https://doi.org/10.26656/fr.2017.5(S1).037).

Nabi, G., Rafique, M., Khalil, A., Nabi, G., Irshad, M., Anwar, M. A., Nawaz, M. A., & Shaheen, S. M. (2026). Types and applications of

electrochemical cells. In M. Rafique, M. Zendehtdel, M. Irshad, & N. Yaghoobi Nia (Eds.), *Functional nanostructures for energy conversion and advanced applications*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.1013532>

Niessen, J., Schröder, U., & Scholz, F. (2004). Exploiting complex carbohydrates for microbial electricity generation: A bacterial fuel cell operating on starch. *Electrochemistry Communications*, 6(9), 955–958. <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2004.07.001>

Observatory of Economic Complexity. (2023). Bananas in Peru trade. <https://oec.world/en/profile/bilateral-product/bananas/reporter/per>

Ohiduzzaman, M., Khan, M. N. I., Khan, K. A., & Paul, B. (2024). Biosynthesis of silver nanoparticles by banana pulp extract: Characterizations, antibacterial activity, and bioelectricity generation. *Heliyon*, 10(3), e25520. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25520>

OpenStax. (2020). 19.4 Electric power. In *Physics*.

OpenStax. (2022). 20.1 Current. In *College Physics 2e*.

Oyeyinka, B. O., & Afolayan, A. J. (2019). Comparative evaluation of the nutritive, mineral, and antinutritive composition of *Musa sinensis* L.

(banana) and *Musa paradisiaca* L. (plantain) fruit compartments. *Plants*, 8(12), 598. <https://doi.org/10.3390/plants8120598>.

Padam, B. S., Tin, H. S., Chye, F. Y., & Abdullah, M. I. (2014). Banana by-products: An under-utilized renewable food biomass with great potential. *Journal of Food Science and Technology*, 51(12), 3527–3545. <https://doi.org/10.1007/s13197-012-0861-2>

Rabaey, K., & Verstraete, W. (2005). Microbial fuel cells: Novel biotechnology for energy generation. *Trends in Biotechnology*, 23(6), 291–298. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2005.04.008>

Rayung, M., Aung, M. M., Azhar, S. C., Abdullah, L. C., Su'ait, M. S., Ahmad, A., & Jamil, S. N. A. M. (2020). Bio-based polymer electrolytes for electrochemical devices: Insight into the ionic conductivity performance. *Materials*, 13(4), 838. <https://doi.org/10.3390/ma13040838>

Rehman, S. U., Khan, K. H., Shah, A., Shah, S. M., Haleem, A., & Hussain, H. (2025). A review on starch-based solid electrolytes and their composites for sustainable Li-ion batteries: A green pathway to energy storage. *International Journal of Biological Macromolecules*, 331(Part 1), 148352. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.148352>

- Revelo, D. M., Hurtado, N. H., & Ruiz, J. O. (2013). Celdas de combustible microbianas (CCMs): Un reto para la remoción de materia orgánica y la generación de energía eléctrica. *Información Tecnológica*, 24(6), 17–28. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642013000600004>
- Santoro, C., Arbizzani, C., Erable, B., & Ieropoulos, I. (2017). Microbial fuel cells: From fundamentals to applications. A review. *Journal of Power Sources*, 356, 225–244. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.03.109>
- Singh, N., Singh, J., Kaur, L., Sodhi, N. S., & Gill, B. S. (2017). Morphological, thermal and rheological properties of starches from different botanical sources. *Food Chemistry*, 81(2), 219–231.
- Sulaiman, S. M., & Seswoya, R. (2021). The performance evaluation on co-digestion of domestic sewage sludge and food waste for methane yield and kinetics analysis. *International Journal of Integrated Engineering*, 13(3), 1–10.
- Surendren, A. K., Mohanty, A. K., Liu, Q., & Misra, M. (2022). A review of biodegradable thermoplastic starches, their blends and composites: Recent developments and opportunities for single-use plastic packaging alternatives. *Green Chemistry*, 24(22), 8606–8631. <https://doi.org/10.1039/D2GC02598A>

Tuhina Tiwari, Manindra Kumar, Madhavi Yadav, & Neelam Srivastava. (2019). Study of Arrowroot Starch-Based Polymer Electrolytes and Its Application in MFC. *Starch - Stärke*, 71 (7-8).
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/star.201800313>

Umoh, E. O. (2024). Evaluation of physico-chemical properties of unripe plantain peels as affected by different drying temperature regimes. *Agriculture and Food Sciences Research*, 11(2), 104–109.
<https://doi.org/10.20448/aesr.v11i2.6178>.

United Nations. (2024). Goal 7: Ensure access to affordable, reliable, sustainable and modern energy for all. Department of Economic and Social Affairs, Sustainable Development.
<https://sdgs.un.org/goals/goal7>

Varshney, P. K., & Gupta, S. (2011). Natural polymer-based electrolytes for electrochemical devices: A review. *Ionics*, 17, 479–483.
<https://doi.org/10.1007/s11581-011-0574-6>

Vásquez García, R. J., & Zavala Ruíz, M. M. (2017). Influencia de la concentración del espárrago verde en bioceldas galvánicas de zinc y cobre para incrementar la producción de energía eléctrica [Tesis de título profesional, Universidad Nacional de Trujillo]. Repositorio Institucional UNT.

http://dspace.unitru.edu.pe/bitstream/handle/UNITRU/9498/VasquezGarcia_R%20-%20ZavalaRuiz_M.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Vasundhara, B. A., Rajashekhara, E., Thammaiah, N., Kulapati, H., Mesta, R. K., & Ragavendra, S. (2021). Proximate composition of banana fruit peel of varieties Grand Naine (AAA), Rajapuri (AAB) and Ney Poovan (AB) at different stages of ripening. *Biological Forum – An International Journal*, 13(4), 784–789.

Vu, H. T., Scarlett, C. J., & Vuong, Q. V. (2018). Phenolic compounds within banana peel and their potential uses: A review. *Journal of Functional Foods*, 40, 238–248. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2017.11.006>.

World Resources Institute. (2024). 4 charts explain greenhouse gas emissions by countries and sectors. <https://www.wri.org/insights/4-charts-explain-greenhouse-gas-emissions-countries-and-sectors>

Xie, F. (2024). Natural polymer starch-based materials for flexible electronic sensor development: A review of recent progress. *Carbohydrate Polymers*, 337, 122116. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2024.122116>

Yang, M., Chang, L., Jiang, F., Zhao, N., Zheng, P., Simbo, J., Yu, X., & Du, S.-K. (2022). Structural, physicochemical and emulsifying properties of starch from banana peels. *International Journal of Biological*

Macromolecules, 215, 1102–1113.
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.07.023>

Yasin, M., Gangan, S., & Panchal, S. K. (2025). Banana peels: A genuine waste or a wonderful opportunity? *Applied Sciences*, 15(6), 3195.
<https://doi.org/10.3390/app15063195>.

Zaini, H. M., Roslan, J., Saallah, S., Munsu, E., Sulaiman, N. S., & Pindi, W. (2022). Banana peels as a bioactive ingredient and its potential application in the food industry. *Journal of Functional Foods*, 92, 105054. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2022.105054>

Zambrano, J. S., & Arteaga Benavides, B. E. (2020). Generación de energía eléctrica a partir de celdas de combustible microbianas. *Revista Tecnoacademia*, 4, 133–136.
<https://revistas.sena.edu.co/index.php/conciencia/article/view/4597/4787>

Zou, F., Tan, C., Zhang, B., Wu, W., & Shang, N. (2022). The valorization of banana by-products: Nutritional composition, bioactivities, applications, and future development. *Foods*, 11(20), 3170.
<https://doi.org/10.3390/foods11203170>.

ANEXOS

Anexo 1

Matriz de consistencia

Título: Evaluación de la influencia del uso de almidón de cáscara de plátano (<i>Musa paradisiaca</i>) en la generación de energía eléctrica en bioceldas galvánicas, Tacna						
Formulación del problema	Hipótesis específica	Objetivos específicos	Variables	Dimensión	Indicadores	Prueba estadística
¿Cuáles son las características fisicoquímicas de la cáscara de plátano (<i>Musa paradisiaca</i>) y su contenido de almidón?	Las características fisicoquímicas de la cáscara de plátano (<i>Musa paradisiaca</i>) y su contenido de almidón permiten conocer	Analizar las características fisicoquímicas de la cáscara de plátano (<i>Musa paradisiaca</i>) y su contenido de almidón.	Independiente Dosis del almidón Condiciones operativas	Física	Cantidad (%) Oxygenación Presencia de catalizador (carbón activado)	
¿Cuál es la dosis las condiciones operativas adecuadas del sistema de biocelda galvánica para la generación de energía eléctrica a partir de almidón de cáscara de plátano (<i>Musa paradisiaca</i>)?	La dosis y las condiciones operativas del sistema de biocelda galvánica influyen en la generación de energía eléctrica a partir de almidón de cáscara de plátano (<i>Musa paradisiaca</i>).	Determinar la dosis y las condiciones operativas óptimas del sistema de biocelda galvánica para la generación de energía eléctrica a partir de almidón de cáscara de plátano (<i>Musa paradisiaca</i>).	Dependiente Generación de energía eléctrica	Física	Voltaje (mV)	Análisis de varianza ANOVA complementand o con la prueba de contraste múltiple de Tukey a un 95 %.
¿Cuál es el desempeño eléctrico de una biocelda galvánica en función de la energía generada y del tiempo de operación empleando el almidón de cáscara de plátano (<i>Musa paradisiaca</i>)?	El desempeño eléctrico de la biocelda galvánica en función de la energía generada y del tiempo de operación es significativo al emplear el almidón de cáscara de plátano (<i>Musa paradisiaca</i>).	Evaluar el desempeño eléctrico de una biocelda galvánica en función de la energía generada y del tiempo de operación empleando el almidón de cáscara de plátano (<i>Musa paradisiaca</i>).				

Anexo 2

Panel fotográfico

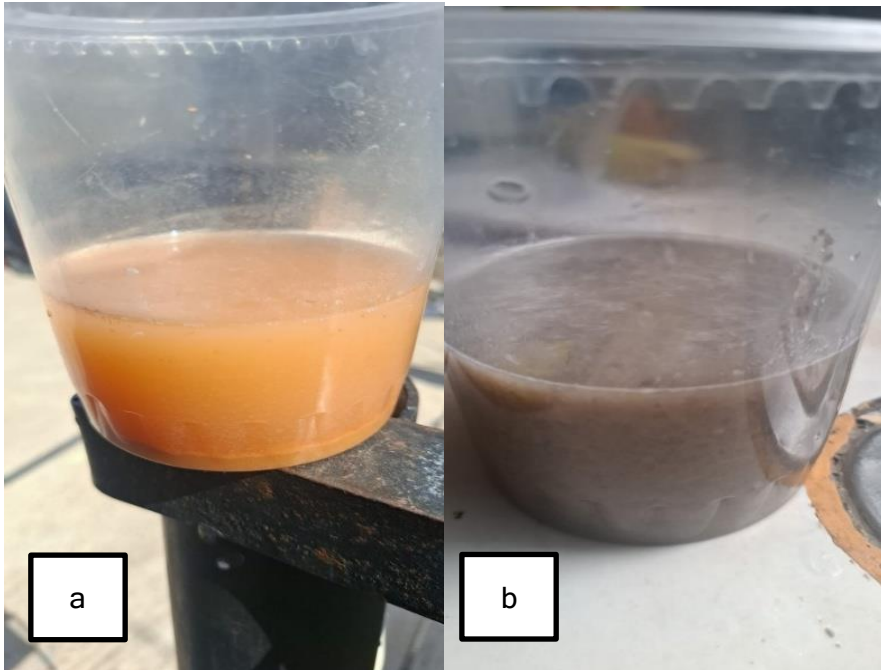
Fotografía 1

Recolección de cáscara de plátano



Fotografía 2

Proceso de obtención del almidón de cáscara de plátano



Nota. Donde a) Corresponde al proceso decantación luego del licuado de la cáscara y b) corresponde al cambio luego de 24 h

Fotografía 3

Almidón de cáscara de plátano obtenido



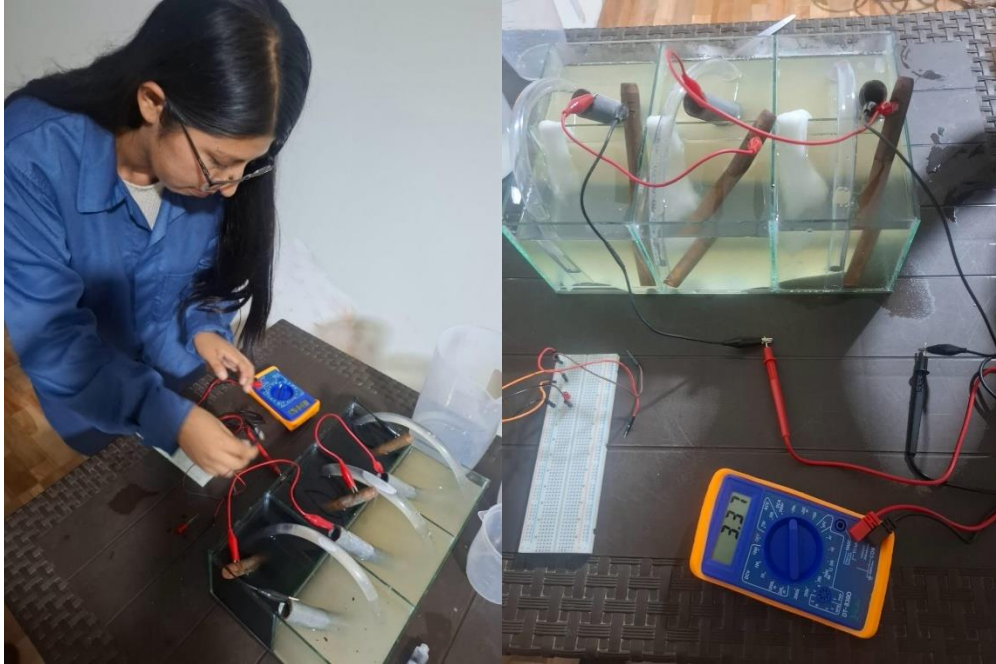
Fotografía 4

Armado del equipo – bioceldas galvánicas en serie



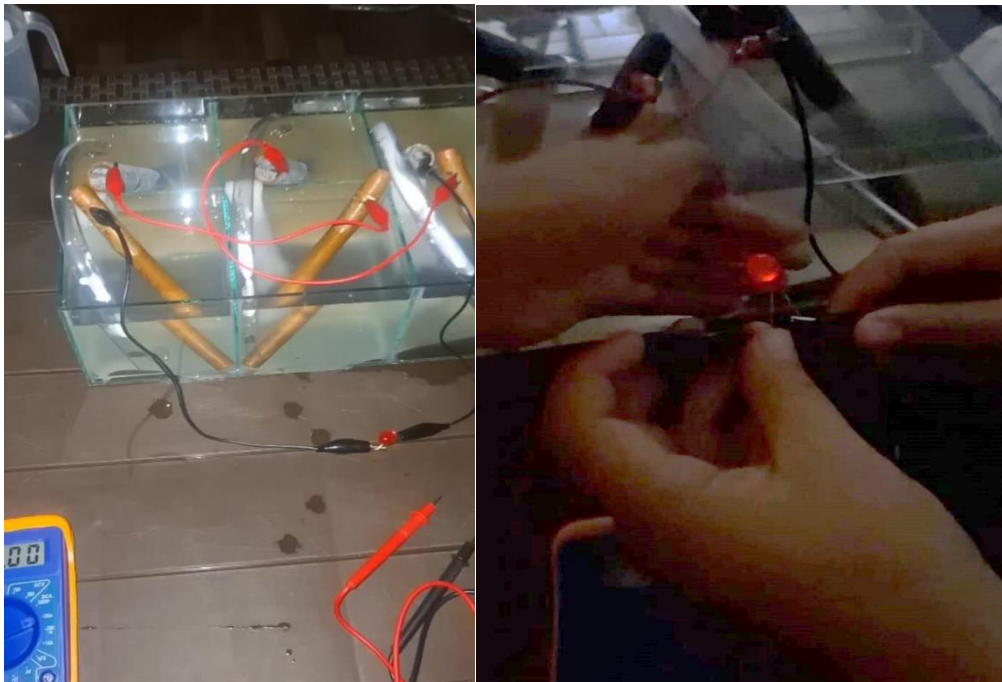
Fotografía 5

Registro de datos de las bioceldas galvánicas



Fotografía 6

Pruebas de encendido de LED



Anexo 3

Tabla de datos registrados por tratamiento

Trata miento	Dosis (g/l)	Carbón activado (Cat.)	O ₂	Rep.	Voltaje máximo (V)	Densidad de corriente (mA/cm ²)	Tiempo (min)
T1	10	Sin	Sin	1	0,255	0,797	38,0
T1	10	Sin	Sin	2	0,256	0,830	33,0
T1	10	Sin	Sin	3	0,248	0,795	28,0
T2	10	Sin	Con	1	0,296	0,915	18,0
T2	10	Sin	Con	2	0,275	0,911	26,0
T2	10	Sin	Con	3	0,275	0,891	21,0
T3	10	Con	Sin	1	0,302	0,912	8,0
T3	10	Con	Sin	2	0,283	0,939	11,0
T3	10	Con	Sin	3	0,290	0,956	14,5
T4	10	Con	Con	1	0,321	1,022	4,0
T4	10	Con	Con	2	0,345	1,045	2,5
T4	10	Con	Con	3	0,331	1,022	6,0
T5	20	Sin	Sin	1	0,345	1,102	22,0
T5	20	Sin	Sin	2	0,338	1,108	26,0
T5	20	Sin	Sin	3	0,344	1,094	19,0
T6	20	Sin	Con	1	0,374	1,237	9,0
T6	20	Sin	Con	2	0,380	1,179	12,5
T6	20	Sin	Con	3	0,388	1,176	10,5
T7	20	Con	Sin	1	0,402	1,211	4,5
T7	20	Con	Sin	2	0,387	1,254	4,0
T7	20	Con	Sin	3	0,407	1,253	7,0
T8	20	Con	Con	1	0,429	1,344	0,8
T8	20	Con	Con	2	0,415	1,336	2,5
T8	20	Con	Con	3	0,425	1,371	1,5

Anexo 4

*Tabla de datos registrados por tratamiento en función al promedio
registrado por hora*

Hora (h)	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
0	0,218	0,254	0,268	0,319	0,308	0,358	0,379	0,428
1	0,252	0,281	0,290	0,329	0,340	0,377	0,395	0,427
2	0,250	0,277	0,287	0,325	0,337	0,373	0,390	0,420
3	0,247	0,274	0,283	0,321	0,332	0,368	0,385	0,415
4	0,243	0,270	0,278	0,317	0,327	0,363	0,380	0,412
5	0,239	0,265	0,274	0,313	0,321	0,358	0,374	0,408
6	0,234	0,261	0,269	0,308	0,316	0,353	0,368	0,403
7	0,229	0,256	0,264	0,304	0,310	0,347	0,362	0,398
8	0,224	0,251	0,258	0,299	0,303	0,342	0,356	0,394
9	0,218	0,246	0,253	0,295	0,297	0,336	0,350	0,390
10	0,212	0,240	0,247	0,290	0,290	0,331	0,344	0,386
11	0,206	0,235	0,241	0,285	0,284	0,325	0,337	0,382
12	0,200	0,229	0,235	0,281	0,277	0,320	0,331	0,379
13	0,193	0,223	0,228	0,276	0,270	0,314	0,324	0,374
14	0,186	0,218	0,222	0,271	0,262	0,308	0,318	0,370
15	0,179	0,212	0,215	0,266	0,255	0,303	0,311	0,366
16	0,172	0,206	0,208	0,261	0,247	0,297	0,304	0,362
17	0,165	0,199	0,201	0,256	0,240	0,291	0,297	0,358
18	0,157	0,193	0,194	0,251	0,232	0,285	0,291	0,353
19	0,149	0,187	0,187	0,246	0,224	0,279	0,284	0,349
20	0,141	0,180	0,180	0,241	0,216	0,273	0,277	0,345
21	0,133	0,174	0,173	0,236	0,208	0,267	0,269	0,340
22	0,125	0,167	0,165	0,231	0,200	0,261	0,262	0,337
23	0,116	0,161	0,158	0,226	0,192	0,255	0,255	0,333
Retención (%)	0,460	0,570	0,540	0,680	0,560	0,670	0,640	0,770