

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE QUÍMICA
CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

Proyecto Final de Graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería
Ambiental

**“Gestión de residuos de coco verde (pipa, *Cocos nucifera L.*) para una empresa
procesadora de alimentos”**

Verónica Fiorella Juárez Piedra

CARTAGO, julio, 2023

TEC | Tecnológico
de Costa Rica

**ingeniería
ambiental**



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

“Gestión de residuos de coco verde (pipa, *Cocos nucifera L.*) para una empresa procesadora de alimentos”

Informe presentado a la Escuela de Química del Instituto Tecnológico de Costa Rica como requisito parcial para optar por el título de Ingeniero Ambiental con el grado de licenciatura

Miembros del tribunal

PhD. Lilliana Abarca Guerrero
Director(a)

Ing. Karla Bolaños Mora
Lector 1

Ing. José Francisco Cubero Cubero
Lector 2

Dra.ir. Mary Luz Barrios Hernández
Coordinador(a) COTRAFIG

Ing. MDA. Laura Quesada Carvajal
Director Escuela de Química

MSc. Diana Zambrano Piamba
Coordinadora Carrera de Ingeniería Ambiental

DEDICATORIA

A mis papás, Carol y Leonel, por su interminable apoyo.

A doña Vero y la familia Méndez, por siempre estar al pendiente.

A Melissa y a Jimena, por escucharme hablar de mi investigación por muchos meses.

Y a Teté, por ser tan bonita.

AGRADECIMIENTOS

A doña Karla Bolaños por ayudarme desde el día 1 en el proyecto.

A la profesora Liliana Abarca por su guía y su motivación.

A don Hugo por su ayuda constante en la empresa.

A Sofía del CIPA y Yohanna del CEQIATEC por su ayuda en los laboratorios.

Al profesor Rommel Cuevas de la escuela de Ingeniería en Construcción por su colaboración en varios aspectos de la investigación.

Al TEC, por ser mi segunda casa durante tantos años.

Finalmente, me agradezco a mí misma, a la Verónica de primer ingreso en la universidad, que ni se imaginaba que este momento iba a llegar.

TABLA DE CONTENIDO

Resumen	19
Abstract	21
Introducción	23
1.1 <i>Objetivos</i>	25
1.1.1 Objetivo general	25
1.1.2 Objetivos específicos	25
Revisión de literatura	26
1.2 <i>Coco en el mundo</i>	26
1.2.1 Consumo de coco en Costa Rica	27
1.3 <i>Anatomía del coco</i>	27
1.3.1 Fases de maduración del coco	28
1.4 <i>Caracterización del coco verde</i>	29
1.5 <i>Problemática ambiental del manejo inadecuado de los residuos de coco verde</i>	34
1.6 <i>Usos de los residuos de coco verde</i>	35
1.6.1 Producción de bioetanol	35
1.6.2 Producción de briquetas	35
1.6.3 Manufactura de carbón activado	37
1.6.4 Sustrato agrícola	37
1.6.5 Otros usos de los residuos de coco verde	41
Materiales y métodos	43
1.7 <i>Lugar de estudio</i>	43
1.8 <i>ESTRATEGIAS DE GESTIÓN</i>	43
1.8.1 Transporte	43
1.8.2 Almacenamiento de los residuos de pipa	43
1.8.2.1 Almacenamiento de las pipas enteras	43
1.8.2.2 Almacenamiento de las pipas trituradas	45
1.9 <i>PROPUESTA DE VALORIZACIÓN</i>	45
1.9.1 Revisión de literatura	45
1.9.2 Muestreo para análisis de humedad, pH y conductividad eléctrica	45
1.9.3 Análisis de humedad, pH y conductividad eléctrica	46

1.9.4	Producción de fibra y polvo de coco verde	47
1.9.5	Análisis granulométrico del polvo de coco verde	47
1.9.6	Cotizaciones maquinaria	47
Resultados y discusión		49
1.10	<i>Situación actual de la gestión de residuos de pipa</i>	49
1.10.1	Organizacional	49
1.10.2	Ambiental	51
1.10.3	Económico	54
1.11	<i>Transporte</i>	54
1.12	<i>Almacenamiento de los residuos de pipa</i>	56
1.12.1	Almacenamiento de las pipas enteras	56
1.12.2	Almacenamiento de las pipas trituradas	58
1.12.3	Almacenamiento de la fibra y polvo seco	58
1.13	<i>Análisis de humedad, pH y conductividad eléctrica</i>	59
1.14	<i>Producción de fibra y polvo</i>	61
1.15	<i>Proceso de producción de fibra y polvo de coco verde</i>	65
1.15.1	Trituración	66
1.15.2	Prensado	66
1.15.3	Clasificación	66
1.15.4	Lavado	68
1.15.5	Maduración, compostaje o fermentación	69
1.15.6	Molienda	70
1.15.7	Tamizado	71
1.15.8	Secado	73
1.15.9	Reclasificación	75
1.16	<i>Proceso sugerido para la valorización de la fibra y polvo de coco verde</i>	75
1.16.1	Triturado	77
1.16.2	Secado	77
1.16.3	Clasificación	77
1.16.4	Lavado	79
1.16.4.1	Métodos de lavado del polvo de coco	79
1.16.4.1.1	Dimensionamiento del tanque de lavado	81

1.16.4.1.2	Dimensionamiento de la centrífuga	81
1.16.4.2	Colecta de agua de lluvia para el lavado	82
1.16.5	Maduración o compostaje	84
1.16.6	Tamizado	85
1.16.7	Molienda	86
1.16.8	Reclasificación	87
1.17	<i>Costos de maquinaria para la producción de polvo y fibra de coco verde</i>	88
Conclusiones		91
Recomendaciones		92
Referencias		93
Apéndices		103
Apéndice 1: Sección longitudinal a través de un coco verde, comúnmente denominado pipa en Costa Rica		104
Apéndice 2: Disposición de pipas en una tarima		105

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Sección longitudinal a través de un coco (izquierda) y vista en planta de la corteza madura (derecha) [10].	28
Figura 2.2. Corte longitudinal a través de un coco verde (izquierda) y un coco maduro (derecha) [12].	29
Figura 2.3. Briquetas de coco verde [36].	36
Figura 2.4. Carbón activado elaborado con cáscaras de coco verde [36].	37
Figura 2.5. Fibra y polvo de coco verde [45].	41
Figura 2.6. Macetas elaboradas con fibra de coco.	42
Figura 2.7. Tableros de partículas elaborados con coco verde [49].	42
Figura 3.1. Muestreo de pipas para el análisis de su humedad, pH y conductividad eléctrica.	46
Figura 4.1. Proceso de producción de agua de pipa.	49
Figura 4.2. Distancia por recorrido para el transporte de residuos de coco verde.	55
Figura 4.3. Pipa con moho en su interior.	57
Figura 4.4. Muestra de coco verde triturado.	60
Figura 4.5. Muestra de coco verde triturado.	64
Figura 4.6. Polvo seco de coco verde.	64
Figura 4.7. Procesos para la producción de fibra de coco verde [44], [55].	65
Figura 4.8. Maquinaria para el procesamiento de los residuos de coco verde [44].	67
Figura 4.9. Esquema del tanque de lavado del polvo de pipa [44].	69
Figura 4.10. Molienda de las cáscaras de pipa [13].	71
Figura 4.11. Fibra y polvo de coco verde después de una molienda en conjunto.	73
Figura 4.12. Secado del sustrato de coco [13].	74
Figura 4.13. Secador rotativo [44].	74
Figura 4.14. Procedimiento para la obtención de fibra y polvo de coco verde.	76
Figura 4.15. Máquina clasificadora de polvo y fibra de coco [60].	78
Figura 4.16. Tamiz rotatorio 1 [60].	79
Figura 4.17. Tamiz rotatorio 2 [60].	79
Figura 4.18. Centrífuga modelo.	82

Figura 4.19. Tambor interno y externo de la centrífuga modelo.....	82
Figura 4.20. Fracción de coco retenida en una malla de 2,80 mm de abertura.	86
Figura 4.21. Fracción de coco con granulometría menor a 1,18 mm.	86
Figura 4.22. Fracción de coco con granulometría menor a 1,18 mm [58].	88
Figura 4.23. Fracción de coco con granulometría menor a 1,18 mm [67].	88
Figura 4.24. Fracción de coco con granulometría menor a 1,18 mm [68].	89
Figura 4.25. Máquina para la trituración, prensado y clasificación de la cáscara de coco verde FORTALMAG [44].....	90

LISTA DE CUADROS

Cuadro 2.1. Principales productores de coco al 2020 [5].	26
Cuadro 2.2. Taxonomía de la palma de coco [9].	27
Cuadro 2.3. Masa y composición media (%) de los componentes del coco, cosechados y evaluados a diferentes edades [16].	31
Cuadro 2.4. Caracterización química de los componentes de la cáscara de coco verde.	32
Cuadro 2.5. Propiedades de los componentes de la cáscara de coco verde.	33
Cuadro 2.6. Diámetros (μm) de fibras de coco verde reportados en la literatura.	34
Cuadro 2.7. Valores de pH y conductividad eléctrica para el sustrato de coco verde con 0, 45, 90, 135 y 180 días de compostaje [46].	39
Cuadro 4.1. Caracterización del líquido de la cáscara de coco verde (LCCV) [52].	53
Cuadro 4.2. Valores de pH, humedad (%) y conductividad eléctrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$) de los residuos de coco verde.	59
Cuadro 4.3. Procesos para la producción de polvo o sustrato de coco verde.	65
Cuadro 4.4. Granulometría del polvo de coco verde.	72
Cuadro 4.5. Determinación de la granulometría del polvo de coco verde.	85
Cuadro 4.6. Información de alguna maquinaria requerida para la producción de polvo y fibra de coco verde.	88
Cuadro 4.7. Información de maquinaria FORTALMAG para la producción de polvo y fibra de coco verde.	90

LISTA DE SIGLAS Y ACRÓNIMOS

CEQIATEC	Centro de Investigación y de Servicios Químicos y Microbiológicos
CIPA	Centro de Investigación en Protección Ambiental
CIVCO	Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
GAM	Gran Área Metropolitana
INEC	Instituto Nacional de Estadísticas y Censos
LCCV	Líquido de cáscara de coco verde
pH	Potencial de hidrógeno
TEC	Tecnológico de Costa Rica

RESUMEN

En Costa Rica se cosechan alrededor de 15 000 toneladas anuales de coco, que puede consumirse en una etapa de madurez joven o verde, siendo denominada en varios países de América Latina como pipa. Su disposición inadecuada puede tener efectos ambientales negativos como cambios impuestos al paisaje y proliferación de insectos y roedores. Este documento presenta una revisión de la literatura enfocada en la aplicación del coco verde como sustrato agrícola, análisis de parámetros físicos y químicos básicos; y estrategias para su gestión y valorización. Se encontró que los usos para los residuos de coco verde son variados y que la principal aplicación para los residuos de pipa en Costa Rica es el agrícola, pudiendo aprovecharse como sustrato, en forma de fibras y polvo, así como parte de la matriz de compostaje. En su estado íntegro, se pueden almacenar 392 unidades/ m^3 , mientras que trituradas 832 unidades/ m^3 . Las pipas poseen una conductividad eléctrica alta (1389 $\mu\text{S}/\text{cm}$), por lo que se debe realizar el lavado y/o prensado del fruto. Para la obtención de fibra y polvo de coco verde se necesita maquinaria como trituradoras, molinos y tamices, espacio para secado y maduración y una pila o centrífuga para el lavado.

Palabras clave: pipa, coco verde, gestión de residuos, residuos, estrategias, usos, fibra.

ABSTRACT

Costa Rica harvests 15 000 annual tons of coconut, that can be consumed in an early or green development stage, which is denominated in various Latin American countries as “pipa”. Its inadequate disposal can have negative environmental impacts like landscape changes, insect proliferation and rodents. This paper presents a literature review focused on the application of green coconut as an agricultural substrate, an analysis of basic physical and chemical properties, and strategies for its management and valorization. It was found that the applications for green coconut are varied and that the main use for the waste in Costa Rica is in agriculture, having the opportunity of being used as fibers and dust or peat, as well as part of a compost matrix. 392 units of whole coconut can be stored per m^3 , while 832 units/ m^3 can be stored crushed. Green coconut has a high electrical conductivity (1389 $\mu\text{S}/\text{cm}$), which is why washing and/or pressing of the fruits is necessary. To obtain dust and fibers, machinery like crushers and mills, space for drying and maturation, and a centrifuge or washing area; are required.

Key words: green coconut, waste management, waste, strategies, uses, peat, fiber.

INTRODUCCIÓN

Se prevé que el consumo mundial de alimentos, que es el principal uso de los productos básicos agrícolas, aumente un 1,4% anual durante la próxima década (2022-2031). Este será impulsado principalmente por el crecimiento de la población. Además, se proyecta que la producción agrícola mundial se intensifique en un 1,1% anual [1]. Lo anterior dará como resultado una mayor generación de residuos a lo largo de la cadena agroalimentaria [2]. Nellemann *et al.* [3] reportan que del 25% al 50% de los alimentos producidos se desechan a lo largo de la cadena de valor. Estos pueden producirse en el campo, después de cosechar los cultivos, y consisten en hojas, tallos y vainas de semillas. También pueden ser residuos del procesamiento de los alimentos, que constan de melaza, fibras, bagazo, cáscaras, pulpas, entre otros; los cuales son subutilizados y generados en enormes cantidades. Además, tienen el potencial de emplearse en actividades como alimentación de animales, mejoramiento del suelo y fertilizadores [4].

Los residuos producidos tienen una disposición inadecuada en muchas ocasiones, debido a que se queman en espacios públicos, contaminando el aire y suelo. Asimismo, sus lixiviados pueden canalizarse hacia una fuente de agua, contaminando así el ambiente acuático [2]. El reúso de los residuos agrícolas permite contrarrestar los efectos ambientales negativos de su manejo inadecuado.

Dentro de los alimentos de gran consumo a nivel mundial se encuentra el *Cocos nucifera L.*, de aquí en adelante denominado coco. Según la Organización de las Naciones Unidas la Alimentación y Agricultura (FAO), para el 2020, la producción mundial de coco fue de 61 520 382 toneladas. Costa Rica ocupa el puesto número 46 del mundo, con 15 000 toneladas de producción anuales [5]. En la industria alimenticia manufacturera de igual manera se producen grandes cantidades de residuos orgánicos, como parte de sus procesos de producción. Una empresa procesadora de alimentos ubicada en la Gran Área Metropolitana de Costa Rica (GAM) no es la excepción. La organización procesa y comercializa agua de pipa, actividad que genera toneladas diarias de fruta residual.

La gestión inadecuada de los residuos de coco verde, también denominado pipa en Costa Rica y otros países de América Latina; genera una variedad de impactos ambientales. Esto se debe a que del 80% al 85% del peso bruto de la fruta está representado por la cáscara, que comúnmente se dispone inadecuadamente [6].

La literatura una variedad de aplicaciones para los residuos de pipa, la mayoría determinadas por investigadores en Brasil. El país sudamericano tiene una industria de productos derivados del coco desarrollada, a diferencia de Costa Rica. Dentro de los usos de los residuos de coco verde se encuentra la producción de etanol lignocelulósico, briquetas, carbón activado, manufactura de zapatos, macetas, rellenos de asientos de vehículos, sustrato agrícola, entre otros. En Costa Rica, una de las principales aplicaciones para los residuos de pipa es el agrícola, pudiendo aprovecharse en forma de fibras y polvo.

La presente investigación está enfocada en la gestión y valorización de las pipas como sustrato agrícola, específicamente en su presentación de fibra (mecha) y polvo. En Costa Rica, el aprovechamiento de los residuos de coco como sustrato agrícola se realiza cuando el fruto se encuentra en un estado de madurez avanzado. Por lo tanto, se pretende plantear la posibilidad de uso del coco inmaduro como medio de cultivo. Para abordar el problema, se realiza una revisión bibliográfica extensiva para la aplicación específica, el análisis de algunos parámetros físicos y químicos del material y aspectos propios de la gestión integral del residuo.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo general

Establecer una estrategia de gestión de residuos de pipa para una empresa procesadora de alimentos.

1.1.2 Objetivos específicos

1. Analizar la situación ambiental, organizacional y económica actual de la gestión de residuos de pipa
2. Definir estrategias para la gestión de los residuos de pipa
3. Proponer la valorización para los residuos de pipa

REVISIÓN DE LITERATURA

1.2 COCO EN EL MUNDO

El coco es un alimento de gran consumo a nivel mundial. Según la Organización de las Naciones Unidas la Alimentación y Agricultura (FAO) [5], para el 2020, la producción de coco fue de 61 520 382 toneladas, de las cuales los cinco principales productores fueron Indonesia, India, Filipinas, Brasil y Sri Lanka, respectivamente (Cuadro 2.1). Esta producción se realizó en 11 575 275 hectáreas cosechadas, de las cuales más del 81% se encuentran en Asia.

El Instituto Nacional de Estadística y Censos de Costa Rica (INEC) [7] indica que para el 2014 la extensión sembrada para el cultivo de coco en Costa Rica era de 1 069,6 hectáreas, de las cuales 908,08 se encontraron en la provincia de Limón. Es decir que alrededor del 84% de la extensión sembrada se encontraba en la provincia de Limón. Dicha institución no reportó datos de producción. Sin embargo, en el 2020, la FAO [5] indicó un estimado de 1500 hectáreas cosechadas a nivel costarricense, con 15 000 toneladas de producción, ubicando a Costa Rica en el puesto número 46 de los productores de coco del mundo.

Cuadro 0.1. Principales productores de coco al 2020 [5].

País	Producción (t)
Indonesia (1)	16 824 848
India (2)	14 695 000
Filipinas (3)	14 490 923
Brasil (4)	2 458 839
Sri Lanka (5)	2 233 600
Costa Rica (46)	15 000
Total mundial	61 520 382

1.2.1 Consumo de coco en Costa Rica

En Costa Rica el coco es un producto no tradicional, caracterizado por una producción poco tecnificada, concentrada en la región Huetar Caribe. De los dos principales mercados del coco, aceite y agua, destacó el agua como el subproducto con mayor potencial. Esto debido a su dinamismo y crecimiento, para el cual se proyecta un aumento en sus ventas de 10% al año entre 2020 y 2026. Entre las variedades de coco para consumo de agua en Costa Rica se encuentra la enana, la cual destaca por su calidad (volumen de agua, Brix, pH) y sabor, así como el bajo rendimiento y calidad de la copra o pulpa [8].

1.3 ANATOMÍA DEL COCO

La palma cocotera, también llamada simplemente cocotero, pertenece a la clase monocotiledónea y su única especie es el coco (*Cocos nucifera.*), tal y como se muestra en el Cuadro 2.2 [9].

Cuadro 0.2. Taxonomía de la palma de coco [9].

Clase	Monocotiledónea
Orden	Arecales
Familia	Arecaceae
Género	Cocos
Especie	<i>Cocos nucifera.</i>

Al fruto del cocotero, se le pueden identificar siete partes [10], de las cuales pocas se utilizan para consumo alimenticio directo. El resto son comúnmente desechadas en el ambiente y rellenos sanitarios, o bien son transformadas en otros productos.

1. Piel exterior impermeable (exocarpio)
2. Capa intermedia gruesa y fibrosa (fibra de coco, mesocarpio)

3. Capa interna, corteza, coque, concha o caparazón interna (endocarpio)
4. Capa de copra o pulpa blanca y aceitosa (endospermo sólido)
5. Cavidad rellena de agua (endosperma líquida)
6. Embrión
7. “Ojos” (3 poros germinales)

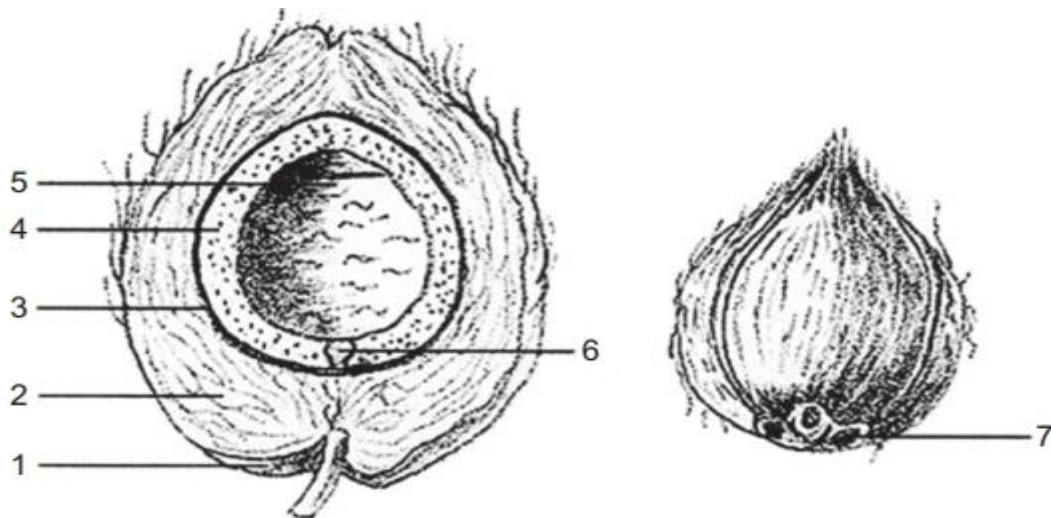


Figura 0.1. Sección longitudinal a través de un coco (izquierda) y vista en planta de la corteza madura (derecha) [10].

1.3.1 Fases de maduración del coco

Las propiedades físicas del coco van a variar con respecto a su fase de maduración. Dependiendo del uso previsto, los cocos son cosechados a dos diferentes etapas de desarrollo. Los frutos destinados a ser consumidos frescos por la cantidad de agua y la carne de textura gelatinosa (endosperma) deben ser cosechados cuando la fruta haya alcanzado su máximo tamaño, pero a una etapa inmadura. Esta se alcanza alrededor de siete meses después de la floración. Dependiendo del cultivo, el color de la fruta en el exterior es verde, amarilla o dorada cuando está inmadura [11].

Los frutos destinados para copra, aceite y leche deben ser cosechados en una fase madura, cuando la carne interior blanca se ha engrosado y endurecido. Este período se alcanza alrededor de doce meses posteriores a la floración. Además, tanto el caparazón interior del

coco, como la cáscara exterior, se habrán tornado de color café. El contenido de agua de la fruta inmadura es alto y es gradualmente absorbida en la carne del coco conforme aumenta la madurez. Los cocos maduros poseen una menor cantidad de agua que los jóvenes [11].



Figura 0.2. Corte longitudinal a través de un coco verde (izquierda) y un coco maduro (derecha) [12].

El coco tierno, coco verde o coco joven es comúnmente llamado pipa. Las empresas de manufactura de alimentos aprovechan el estado joven para poder extraer la mayor cantidad de agua disponible durante la vida del coco. Esto se hace también considerando que el sabor del agua varía con la madurez de la fruta. En Costa Rica el coco se consume en todos los estados de madurez comerciables.

1.4 CARACTERIZACIÓN DEL COCO VERDE

Por medio de la revisión de literatura, se encontró que la caracterización del coco verde fue mucho menos común en comparación con la del coco café o maduro. De hecho, la mayor parte de las publicaciones no indican si están trabajando con la fruta en su edad joven o

madura. Así pues, a continuación, se procederá a hacer una recopilación de la información específica para el coco verde.

Autores como Carrijo [19],[23],[43], de Liz [19], [44], Rosa [6], [13] y Mattos [42] han sido pioneros en la investigación de los residuos de coco verde o pipa, por lo que sus estudios serán referenciados frecuentemente en el presente trabajo. La mayor parte de la literatura temática al coco verde es proveniente de Brasil, lo cual podría ser considerado un indicador de las tendencias de consumo de la fruta en dicho país.

Rosa *et al.* [6], [13] comentan que los residuos de coco verde, que representan alrededor del 80% al 85% de la masa bruta del fruto, se encuentran en desventaja con respecto al coco maduro o café en materia de aplicaciones. Esto es debido a la elevada humedad del fruto, que es cercana al 85%; así como las características de la fibra.

La caracterización química y física de los residuos de pipa es compleja debido a que la variación de las propiedades está delimitada por varios motivos. Entre ellos se encuentran la edad de la fruta y la localización geográfica de donde fueron cultivadas. Además, los métodos de extracción y condiciones experimentales son definitivos en la determinación de datos como porcentajes de lignina y celulosa [14]. De igual manera, la época del año en que se cosechó la fruta y la cantidad de lluvias, son factores determinantes [15].

A continuación, en el Cuadro 2.3 se presenta la masa y composición media de las partes del coco de distintas variedades. Los frutos fueron cosechados y evaluados a diferentes edades.

Cuadro 0.3. Masa y composición media (%) de los componentes del coco, cosechados y evaluados a diferentes edades [16].

Variedad de coco	Edad de evaluación (meses)	Peso del fruto (g)	Constitución del fruto (%)			
			Cáscara + fibra	Coque o caparazón interno	Albúmina o endosperma	
					Sólido	Líquido
Enano verde	6	1616	65	6	5	24
	7	1760	66	9	8	16
	12	830	49	12	28	11
Enano rojo	6	1413	59	7	8	26
	7	1574	64	7	9	19
	12	866	44	12	28	16
Enano amarillo	6	1305	67	9	5	19
	7	1510	68	6	8	18
	12	703	43	12	29	15

Como se puede observar, todas las variedades presentan un peso del fruto mayor cuando están en edad joven, alcanzando el valor máximo a los 7 meses. De igual manera es interesante notar que el peso de la cáscara externa y las fibras es mayor cuando el coco tiene menos de 12 meses de desarrollo. El caparazón interno no se ha solidificado totalmente cuando el fruto está verde, por lo que presenta una masa menor en comparación a cuando está maduro. Lo mismo sucede con la pulpa o endosperma sólida, en estado joven tiene un peso menor que, al madurar y absorber el líquido, se solidifica más y aumenta su peso.

En el Cuadro 2.4. se presentan una serie de caracterizaciones químicas correspondientes a los residuos de coco verde, que incluyen fibra, polvo o una combinación de ambos. Para la

comercialización de los residuos de coco verde como sustrato agrícola es común realizar el lavado de los mismos, por lo que se incluye en la información presentada.

Cuadro 0.4. Caracterización química de los componentes de la cáscara de coco verde.

Elemento	Parte del coco verde			
	Polvo		Fibras + polvo lavado	Fibras + polvo sin lavar
	Valor ($g\ kg^{-1}$)[19]	Valor ($g\ kg^{-1}$)[20]	Valor ($g\ kg^{-1}$) [21]	Valor (%) [17]
N	6,52	2,38	5,60	0,46
P	1,42	1,14	1,00	-
K	11,50	9,25	2,80	-
Ca	6,80	7,20	0,60	-
Mg	1,79	0,99	0,60	-
Na	12,50	11,12	$2,20 \times 10^{-3}$	-
Fe	1,97	2,04	$7,53 \times 10^{-2}$	-
Cu	$6,60 \times 10^{-3}$	$0,40 \times 10^{-3}$	$8,00 \times 10^{-4}$	-
Zn	$31,80 \times 10^{-3}$	$22,12 \times 10^{-3}$	$8,40 \times 10^{-3}$	-
Mn	$23,80 \times 10^{-3}$	$7,35 \times 10^{-3}$	$4,00 \times 10^{-3}$	-
S	-	-	0,30	-
B	-	-	$2,16 \times 10^{-2}$	-
C	-	-	-	43,30
H	-	-	-	5,35

Liz y Carrijo [21] estimaron que las concentraciones de fósforo, potasio, calcio, magnesio, sodio, hierro, cobre, zinc y magnesio fueron todas menores para el producto analizado. Además, fueron los únicos autores que mostraron valores para el azufre y el boro. La

información de las fibras y polvo sin lavar es de difícil análisis con las otras debido a las unidades presentadas por los autores.

Cuadro 0.5. Propiedades de los componentes de la cáscara de coco verde.

Característica	Partes del coco verde	
	Fibras lavadas + polvo (sustrato)	Fibras + polvo sin lavar
	Valor [21]	Valor [17]
Materia seca (%)	93,50%	-
Relación C/N	74:1	94,30
Celulosa (%)	56,80%	35,52%
Hemicelulosa (%)	-	33,41%
Lignina (%)	29,90%	22,28%
Cenizas (%)	3,80%	7,70%
Porosidad total (%)	0,91	-
Agua fácilmente disponible (1 a 5 kPa de tensión) (%)	14,90	-
Capacidad de aireación (%)	16,50	-

El cuadro anterior muestra características varias de los componentes de las cáscaras de coco verde. Es importante recalcar que ambos estudios fueron realizados con diferentes objetivos, por lo que muchos datos que se presentan para uno no están disponibles para el otro. Por ejemplo, Liz y Carrijo [21] analizan las características para una aplicación como sustrato agrícola, mientras que Marafon *et al.* [17] para generación de energía.

Las fibras de coco se caracterizan por su dureza y durabilidad, características que son atribuidas al alto contenido de lignina en comparación con otras fibras naturales [18]. Otros autores reportan que el porcentaje de lignina varía de $(37,2 \pm 0,8) \%$ a $(43,9 \pm 0,7) \%$ y el de

celulosa de $(31,5 \pm 0,1) \%$ al $(37,4 \pm 0,5) \%$. Esta composición no varió significativamente según el punto de maduración de la variedad enana verde [22]. Además, Silva [19] y Sático *et al.* [20], presentan valores de materia orgánica para el polvo de la cáscara de $72,58 \times 10^{-3} g kg^{-1}$ y $1,45 g kg^{-1}$, respectivamente.

Para aplicaciones como elaboración de zapatos, rellenos de asientos de automóviles y desarrollo de compuestos poliméricos, el diámetro promedio de las fibras de la cáscara de coco verde es de gran relevancia, por lo que en el Cuadro 2.6 se presentan valores encontrados en la literatura.

Cuadro 0.6. Diámetros (μm) de fibras de coco verde reportados en la literatura.

	Diámetro promedio (μm)			
	Mínimo	Máximo	Promedio reportado	Referencia
Fibras de coco verde	$272,63 \pm 2,58$	$513,71 \pm 2,53$	-	M.G. Lomelí-Ramírez <i>et al.</i> [14]
	69	495	157	A.I.S. Brígida <i>et al.</i> [23]
	NR	NR	200	M.C.A.M Leite <i>et al.</i> [24]

Es importante tomar en cuenta que el diámetro de las fibras no es uniforme a lo largo de ellas. Además, que el fruto puede tener fibras finas, medias y gruesas [14].

1.5 PROBLEMÁTICA AMBIENTAL DEL MANEJO INADECUADO DE LOS RESIDUOS DE COCO VERDE

Existen muchas razones por las que se debe dar una gestión adecuada a los residuos de coco verde. Una de ellas es porque del 80 al 85% del peso bruto de la fruta está representado por la cáscara, que comúnmente se dispone en el ambiente incorrectamente [13]. Asimismo,

cuando los frutos son enviados a vertederos o rellenos sanitarios, contribuyen de manera significativa en la reducción de su vida útil, esto como producto del volumen que requieren los mismos [33]. Otro motivo es por su tiempo de descomposición, el cual dura de 8 a 12 años [25]- [26].

El aprovechamiento de los residuos de pipa permite la reducción de efectos ambientales negativos donde algunos de ellos son: cambios impuestos al paisaje, proliferación de insectos vectores de enfermedades y creación de refugio para animales venenosos y roedores. De igual manera, estos residuos impiden el paso de agua a través de canales, provocando inundaciones y daños estructurales [19]. De hecho, se ha encontrado que las cáscaras de coco albergan *Aedes aegypti* y *Aedes albopictus* [27].

1.6 USOS DE LOS RESIDUOS DE COCO VERDE

Los residuos de coco han encontrado una variedad de aplicaciones en la industria. A continuación, se presentan los más comunes.

1.6.1 Producción de bioetanol

El uso de residuos lignocelulósicos como fuente renovable de azúcares fermentables presenta una forma de aumentar la producción de biocombustibles. Esto es debido a que dichos materiales no contribuyen a la competencia de alimentos y no hay necesidad de cultivar áreas. Se utilizan las cáscaras de coco verde, así como las hojas y tallos del árbol cocotero para la producción de bioetanol y recientemente butanol. Los residuos pueden ser pretratados mediante procesos ácidos, alcalinos, ácido-alcalinos e hidrotérmicos. La biomasa pretratada es sometida a una hidrólisis enzimática, para luego fermentarse. Finalmente, se da la purificación y cuantificación de los productos finales. La producción de etanol es dependiente del tratamiento que se le aplique el material, así como la naturaleza de los frutos [20, 28-32].

1.6.2 Producción de briquetas

Las briquetas de cáscaras de coco verde tienen el objetivo de ser una fuente de energía alternativa. Además, se pretende que el producto contribuya en el desarrollo de la cadena

comercial del coco, por medio del agregado de valor y la generación de empleo e ingresos a los colaboradores. De igual manera, contribuyen con el fin de la economía lineal, encaminando hacia la economía circular. El proceso de briquetaje consiste en la aplicación de presión en una masa de partículas diversas, con el objetivo de convertirlas en un sólido de alta densidad. Dentro del equipo necesario para la producción de briquetas de cáscara de coco verde se encuentran trituradoras, secadores, cintas transportadoras y briquetadoras (extrusoras). El aumento de la cantidad de biomasa en la producción de briquetas aumenta su humedad y poder calorífico. Esto indica que el uso de biomasa reduce la necesidad de material de mezcla como cenizas, almidón o agua; además de reducir la cantidad de energía necesaria en el proceso de extrusión. El poder calorífico del material varía de $11,7 \text{ MJ kg}^{-1}$ a $19,47 \text{ MJ kg}^{-1}$ [33]-[35].



Figura 0.3. Briquetas de coco verde [36].

1.6.3 Manufactura de carbón activado

El carbón activado proveniente de cáscaras de pipa ha demostrado factibilidad para la adsorción de antibióticos como enrofloxacin, presente en aguas residuales de medicina veterinaria. Bajo condiciones específicas, se logró una eficiencia de remoción de 97,58%. Además, resultó ser un adsorbente económico, con un costo de INR 294,80 (USD 3,56) por kg para el año 2020 [37]. También fue adecuado en la adsorción de dióxido de carbono proveniente de gases de combustión. Los resultados indicaron que la capacidad de adsorción depende del tamaño de poro, área superficial y volumen de microporo [38]. Actualmente, en la Escuela de Química del Tecnológico de Costa Rica (TEC) se está investigando la preparación, así como factibilidad técnica y económica de la producción de carbón activado a partir de pipas.

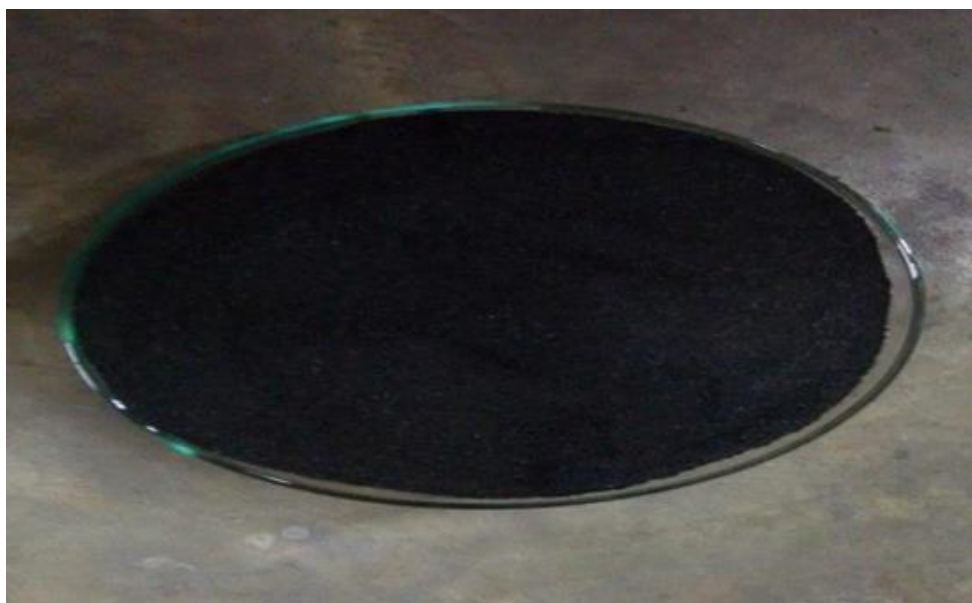


Figura 0.4. Carbón activado elaborado con cáscaras de coco verde [36].

1.6.4 Sustrato agrícola

El desarrollo de cultivos sin suelo ha mostrado una tendencia de crecimiento rápida desde la década de 1970. Esta técnica involucra medios de crecimiento como compost, mulch, aserrín, turba y otros residuos orgánicos como cáscaras de maní y fibra de coco [39].

El residuo o polvo de la cáscara de coco maduro es utilizado como sustrato agrícola, principalmente por presentar una estructura física que proporciona una alta porosidad, un alto potencial de retención de humedad y por ser biodegradable [6]. Los productos derivados de los residuos de coco se utilizan a diferentes escalas, desde jardines en hogares hasta la producción industrial de semillas, almácigos, flores y verduras [40]-[42].

En la actualidad, los residuos de fibra de coco maduro son comercialmente populares, utilizados amplia y exitosamente como un sustituto amigable con el ambiente de la turba. Se utilizan comúnmente en el crecimiento de plantas en maceta [43]. Sin embargo, es importante recalcar que el uso predominante del sustrato de coco es el de medio inerte; es decir, funciona sólo como soporte para el desarrollo de las plantas y no como proveedor de nutrientes [44].

A diferencia del coco maduro, la fibra y polvo de coco verde aún no son ampliamente utilizados. No obstante, pueden convertirse en una importante materia prima en la producción de sustratos para la producción de plántulas o para el cultivo sin uso de suelo. El uso de cáscaras de coco verde es viable porque sus componentes son casi inertes y tienen una alta porosidad. Es decir, no tienen los nutrientes esenciales para las plantas, como se mencionó anteriormente. Por lo tanto, la adición de nutrientes es necesaria de acuerdo con las necesidades de la especie que se va a cultivar [21].

Para obtener fibra y polvo, y utilizarlos como sustrato, la cáscara de coco se somete a varias operaciones como corte, desfibrado, secado, molienda, lavado y, cuando es necesario, compostaje o maduración. Para la producción de plántulas se debe madurar el sustrato, pero para el cultivo de flores y hortalizas sin suelo no es absolutamente necesario. Los nutrientes para el cultivo deben añadirse en la fase previa a la plantación o mediante fertirrigación [25].

Si bien las cáscaras de coco verde presentan una composición física adecuada para poder ser utilizadas como sustrato agrícola, tienen la desventaja de tener valores muy variables en términos del pH y conductividad eléctrica [21]. Esta variabilidad resulta negativa en la propia aplicación del sustrato, debido a las necesidades específicas de los cultivos. Es decir, un lote

A de sustrato podría tener valores de pH y conductividad eléctrica distintos a los de un lote B.

La presencia de taninos, cloruro de potasio (KCl) y cloruro de sodio (NaCl) en la cáscara del coco verde en altas concentraciones, puede ser perjudicial para el desarrollo de las plantas, principalmente las plántulas. Estos compuestos pueden eliminarse parcialmente, lavando el producto en agua limpia, libre de sustancias químicas y patógenos, evitando la pérdida de las fibras pequeñas [45]. También, en algunas ocasiones, el compostaje antes de la utilización del material puede resultar beneficioso en este aspecto [21].

El Cuadro 2.7 muestra cómo el pH aumenta y la conductividad eléctrica disminuye con el tiempo de compostaje.

Cuadro 0.7. Valores de pH y conductividad eléctrica para el sustrato de coco verde con 0, 45, 90, 135 y 180 días de compostaje [46].

Sustrato prelavado	pH	Conductividad eléctrica ($dS m^{-1}$)
S0	5,0	8,5
S45	5,9	5,0
S90	6,2	5,7
S135	6,1	5,7
S180	6,2	5,5

Autores reportan valores de pH y conductividad eléctrica variados. Por ejemplo, para fibras prelavadas de coco verde, Carrijo *et al.* [45], presentan un pH de 6,4 y una conductividad eléctrica de $2,4 mS cm^{-1}$ ($2400 S cm^{-1}$). Mientras que Rosa *et al.* [6], indican un rango de pH de 4,8 a 5,2 (sin especificar si las fibras fueron lavadas o no), una conductividad eléctrica de $4,74 dS m^{-1}$ ($4740 S cm^{-1}$) para fibras no lavadas y valores menores a $1,5 dS m^{-1}$ ($1500 S cm^{-1}$) para lavadas.

Mattos *et al.* [44] muestran valores de pH entre 5,61 y 5,89 cuando las fibras no se han lavado; y de 6,15 cuando se han lavado una vez. La conductividad eléctrica fue de $1,42 \text{ dS m}^{-1}$ (1420 S cm^{-1}) con cero lavados y de $0,29 \text{ dS m}^{-1}$ (290 S cm^{-1}) con un lavado. Ambos análisis fueron realizados con el método de extracción de sustrato saturado, con una suspensión 1:1,5 sustrato: agua. Los investigadores realizaron hasta tres lavados para las muestras analizadas, donde se mostró que el primero logró aumentar significativamente el pH de las muestras y disminuir significativamente los valores de conductividad eléctrica. A partir del segundo lavado, las variaciones en pH y conductividad eléctrica no fueron significativas.

Otro valor de pH reportado es 6,55 (sin especificar si se hizo lavado) [47]. Aragão, Santos y Aragão [48], indican un pH de 5,4 y una conductividad eléctrica de $1,8 \text{ dS m}^{-1}$ (1800 S cm^{-1}) (de nuevo sin comentar si se hizo un lavado previo).

La humedad también es un factor determinante de la calidad del producto, así como su capacidad de comercialización. Inicialmente, el coco verde presenta una humedad del 85%. Después del triturado, esta cantidad es reducible hasta 15%- 20% con un secado por cuatro días [6]. Para la comercialización del polvo en bolsas, la humedad final del producto puede estar entre el 15% y 25% [13].

De manera positiva, los productos derivados de la pipa que van a ser utilizados para crecimiento vegetal confieren los menores costos de producción y garantizan el uso de toda la cáscara de coco [42].

Además, el uso de estos residuos como sustrato para la producción de plántulas y el cultivo de hortalizas, puede favorecer la competitividad en la agroindustria, lo que permite una mayor remuneración de los horticultores y, en consecuencia, inducir la mejora en la calidad de vida de los implicados [21].



Figura 0.5. Fibra y polvo de coco verde [45].

1.6.5 Otros usos de los residuos de coco verde

Otros usos de los residuos incluyen: fibras en la producción de la matriz de cemento [49] y manufactura de zapatos [50]. Además, las fibras se utilizan en una serie de productos como macetas, biomantas y limitadores de camas de cultivo. De igual manera, también se pueden encontrar en rellenos de asientos de vehículos, materiales poliméricos, placas térmicas y acústicas y tableros ecológicos [42]. Las macetas de fibra de coco son de fácil disponibilidad en Costa Rica, pudiendo encontrarse en supermercados, viveros, ferreterías y a pequeños productores.



Figura 0.6. Macetas elaboradas con fibra de coco.



Figura 0.7. Tableros de partículas elaborados con coco verde [49].

MATERIALES Y MÉTODOS

1.7 LUGAR DE ESTUDIO

La presente investigación se realizó en una empresa procesadora y comercializadora de productos alimenticios ubicada en el Gran Área Metropolitana de Costa Rica. La misma ofrece alimentos enteros como chile dulce y tomate, procesados como ajo pelado y brócoli en floretes, preparados tales como gallo pinto y guacamole, así como ensaladas y bebidas. Este tipo de productos producen una variedad de residuos agroindustriales, siendo algunos de ellos el coco verde o pipa, como producto de la extracción de su agua. Durante la investigación se realizaron múltiples visitas a la empresa con el objetivo de analizar la situación ambiental, organizacional y económica de la gestión de residuos de pipa.

1.8 ESTRATEGIAS DE GESTIÓN

1.8.1 Transporte

La distancia de transporte de los residuos de coco se analizó utilizando la herramienta Google Maps para evaluar. Además, se consultó a empresarios particulares sobre el costo del transporte, que toma en cuenta factores como tiempo de carga del material, distancia, masa a transportar y necesidad de equipo de volteo para la descarga de los frutos.

1.8.2 Almacenamiento de los residuos de pipa

1.8.2.1 Almacenamiento de las pipas enteras

Para determinar el espacio de almacenamiento necesario para las pipas enteras se utilizó una tarima de 120cm x 80cm. En ella se posicionaron las frutas suficientes para que la superficie quedase completamente cubierta. Seguidamente, se colocó una superficie plana encima de las pipas, para poder medir y estimar la altura promedio de estas. Todos los cocos fueron seleccionados al azar y la prueba fue realizada en una única ocasión.

1.8.2.2 Almacenamiento de las pipas trituradas

El espacio para el almacenamiento de pipas trituradas también fue determinado. En un beaker de 2000 ml se agregó toda una pipa triturada y húmeda, presionando el material sin llegar a extraer el líquido. Se midió la altura que ocupó el material en el beaker, así como el diámetro del recipiente; para obtener el volumen de llenado en cm^3 . Mediante este procedimiento se obtuvo una aproximación del espacio requerido, por lo que el resultado es dependiente del tamaño de los frutos. Esta estimación permitió comparar el espacio que requieren los frutos enteros con los triturados. El mismo procedimiento fue aplicado para la fibra y polvo seco, después de secar por una semana y separar las fracciones manualmente. A la fibra sí se le aplicó presión en el beaker, mientras que al polvo no.

1.9 PROPUESTA DE VALORIZACIÓN

1.9.1 Revisión de literatura

Para la definición de estrategias de gestión de los residuos de pipa y alternativas para la valorización de estos, se realizó una revisión bibliográfica. La búsqueda estuvo principalmente basada en artículos científicos y publicaciones técnicas particulares al coco en su estado de desarrollo inmaduro. El análisis de dichas fuentes permitió filtrar información perteneciente al coco maduro, factor que pudo alterar la toma de decisiones en el presente estudio. Esto debido a las diferencias en las características físicas y químicas que posee el fruto cuando tiene una madurez avanzada, en comparación a cuando el coco está verde o inmaduro.

1.9.2 Muestreo para análisis de humedad, pH y conductividad eléctrica

El muestreo de las pipas se realizó durante una semana laboral de la empresa. En dicho periodo, se recolectaron 30 frutas al día durante un tiempo de 30 minutos, todos los días a la misma hora. En total se obtuvieron 150 cocos verdes (pipas). Todas las pipas fueron almacenadas en una bodega refrigerada a $(4\pm 1) ^\circ C$. El último día de muestreo, se realizó un

cuarteo con las 150 pipas disponibles. Dicho se hizo de tal manera que las 150 pipas se dividieron en 4 partes (2 partes con 38 pipas y 2 con 37 pipas). Seguidamente, se tomó una sección con 38 frutos, que se volvió a dividir en 4 cuatro partes, descartándose el resto. El proceso se repitió una vez más, hasta obtener 5 pipas, de las cuales 2 fueron almacenadas en caso de errores en los análisis posteriores. Los otros 3 cocos fueron triturados y llevados al Centro de Investigación y de Servicios Químicos y Microbiológicos (CEQIATEC), en la sede central del Tecnológico de Costa Rica (TEC) para la medición de su humedad, pH y conductividad eléctrica.

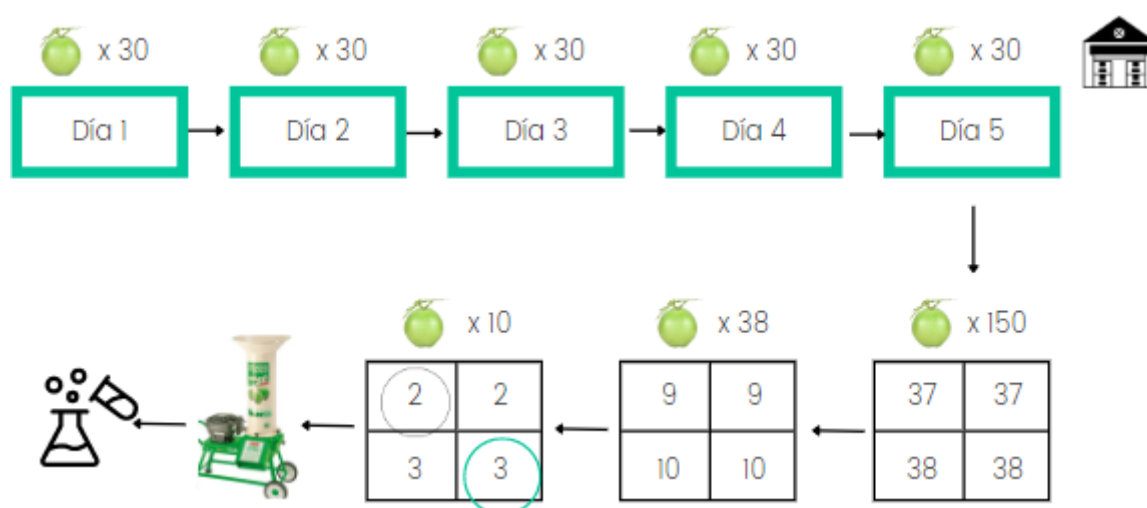


Figura 0.1. Muestreo de pipas para el análisis de su humedad, pH y conductividad eléctrica.

1.9.3 Análisis de humedad, pH y conductividad eléctrica

Se analizaron dos muestras, una de la pipa solamente triturada y otra de la pipa triturada y lavada. El coco verde posee cantidades importantes de taninos, cloruro de potasio (KCl) y cloruro de sodio (NaCl) [45], que pueden afectar el crecimiento y desarrollo de los almácigos y plantas, en caso de que los residuos se quieran utilizar como sustrato para la producción de estos. Por ello, se analizar el cambio de pH y conductividad eléctrica de las fibras y polvo de coco después de un lavado.

El procedimiento de lavado se realizó como lo indica Mattos *et al.* [44], a escala de laboratorio. Se tomaron 500 gramos de pipa triturada, a los cuales se agregó 1 litro de agua

potable directa del tubo, en una relación 1:2. Se dejó reposar durante 15 minutos, mezclando y presionando las fibras cada 5 minutos. Al finalizar el tiempo establecido, se drenó el agua con ayuda del textil de una camiseta como filtro, teniendo especial cuidado de no desechar el material más fino.

A las dos muestras se les realizaron análisis de humedad, pH y conductividad eléctrica. La humedad se midió con una balanza de humedad marca OHAUS modelo MB90. Para el pH y la conductividad eléctrica se empleó el método de extracción del sustrato saturado, utilizando relaciones sustrato/agua 1:2 y 1:5, respectivamente. El pHmetro usado fue el Orion Star A221 de la marca Thermo Scientific, mientras que el modelo del conductímetro fue EC300A de EcoSense.

1.9.4 Producción de fibra y polvo de coco verde

La selección de las pipas para el análisis se hizo de manera aleatoria en la empresa de interés. Los cocos fueron triturados con la máquina trituradora TR 200 de Trapp y puestas a secar en un patio bajo techo durante una semana. A continuación, fueron llevadas al CIPA, donde se realizó una separación manual de las fibras y polvo, debido a que los tamices vibratorios disponibles no permitieron su clasificación.

1.9.5 Análisis granulométrico del polvo de coco verde

Con el objetivo de definir los tamaños de abertura necesarios para el tamizado del polvo de coco verde, se realizó una prueba granulométrica. Se usó un agitador de tamices Tyler modelo RX-29 con tamices de aberturas de 1,18 mm, 1,70 mm, 2,00 mm, 2,36 mm y 2,80 mm. El tiempo total de vibración aplicado fue de 4 minutos.

1.9.6 Cotizaciones maquinaria

Se realizaron una serie de cotizaciones a empresas nacionales y brasileñas para conocer el costo de la maquinaria necesaria para la producción de fibra y polvo de coco verde. Estas

fueron contactadas mediante búsquedas en redes sociales, así como contactos de la academia y de la empresa de interés.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1.10 SITUACIÓN ACTUAL DE LA GESTIÓN DE RESIDUOS DE PIPA

1.10.1 Organizacional

Los residuos de pipa de la presente investigación provienen de la industria alimenticia. Para brindar una gestión adecuada, se debe conocer el proceso de su generación. Por ello, el proceso de extracción de agua de pipa (y su subsecuente generación de residuos) se describe a continuación:

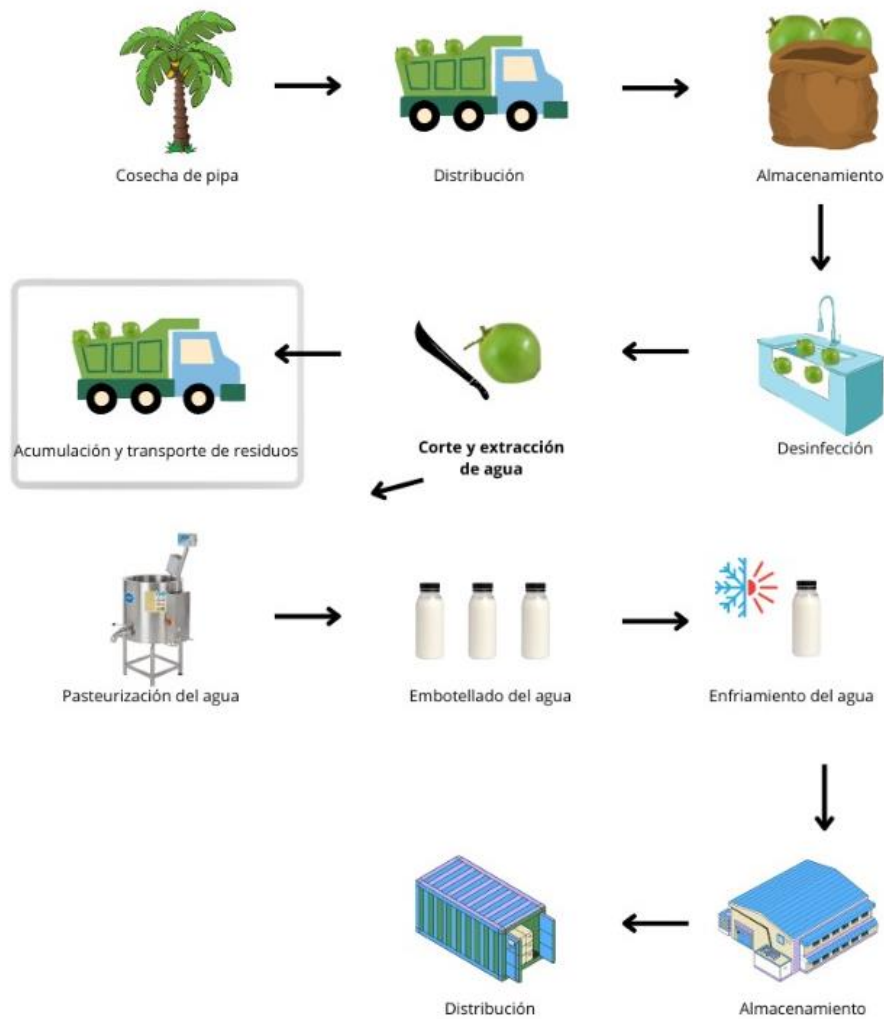


Figura 0.1. Proceso de producción de agua de pipa.

Cosecha de pipa

La fruta es proveniente de la región Caribe de Costa Rica, específicamente de Guápiles y Sarapiquí, en la provincia de Limón. Los cocos son cosechados de 7-8 meses después de su floración y pertenecen a las variedades filipino enano y enano verde.

Distribución

Después de su cosecha, la fruta es transportada mediante un camión a la empresa de interés, ubicada en el Gran Área Metropolitana de Costa Rica. En promedio, la frecuencia de distribución es de 1 vez al día, 6 veces a la semana. Estos repartos son dependientes de la necesidad de comercialización.

Almacenamiento

El almacenamiento de las pipas, previo a su procesamiento, se realiza al aire libre, en sacos con una capacidad máxima de 15 unidades. El tiempo de almacenamiento es variado, no obstante, el máximo periodo es de 2 días.

Desinfección

Los cocos verdes son colocados en una pileta con agua e hipoclorito de sodio (NaClO) al 12%, donde permanecen hasta su corte. Esta práctica asegura la desinfección adecuada de la parte exterior de la fruta.

Corte y extracción de agua

Para extraer el agua de pipa, se hace una serie de cortes a la fruta, con ayuda de un machete.

Acumulación y transporte de residuos

Posterior a la extracción del agua, la pipa es transportada mediante un tornillo sin fin hacia el cajón de una traileta con capacidad de 15 toneladas, de $28 m^3$. Dependiendo de los periodos de producción y comercialización, los residuos son transportados a su sitio de tratamiento hasta 2 veces al día, 5 o 6 veces por semana.

Pasteurización

El agua de pipa se somete a una fase de pasteurización, mediante la cual se eliminan patógenos. Este paso es esencial para la comercialización del producto.

Embotellado y enfriamiento del agua

Seguido de la pasteurización, se embotella el producto. Debido a que el agua resulta caliente del proceso de pasteurizado, se somete a un enfriamiento por choque térmico.

Almacenamiento y distribución

Las botellas con agua de pipa son almacenadas en bodegas refrigeradas a $(4\pm 1) ^\circ C$, para posteriormente ser distribuidas a los clientes.

1.10.2 Ambiental

Grandes cantidades de residuos de pipa son generadas como producto de la extracción del agua. Dependiendo de la producción, el número de frutas de desecho generadas al día varía de 10 560 a 13 200 unidades. No todos los cocos verdes tienen la misma masa, para efectos de la presente investigación se considerarán de 1,12 kg cada uno, de acuerdo con valores entregados por la empresa. Además, para efectos de dimensionamiento, se tomará la máxima producción diaria, que también considera oportunidades de crecimiento de la empresa. Lo anterior significa que, en promedio, se generan 14 784 kg (14,8 t) de residuos de pipa al día,

que corresponde a 73 920 kg a la semana (73,9 t) y 3 843 840 kg anuales (3843,8 t), considerando una semana laboral de 5 días.

Los residuos de pipa, que a partir de este punto no serán considerados como residuos, sino como materia prima, llegan a formar parte de una matriz de compost orgánico. El transporte y tratamiento de los cocos es realizado por parte de un gestor ambiental autorizado por el Ministerio de Salud de Costa Rica.

El volumen de pipas generado hace que uno de los principales efectos sean los cambios impuestos al paisaje [21]. Tomando en cuenta la cantidad de residuos de coco verde generados al día, así como su transporte a su sitio de disposición o tratamiento; se va a esperar una gran acumulación de dichos materiales. Muchas veces, no se va a tener un terreno lo suficientemente grande para poder disponer las pipas de manera que no se formen cúmulos o montañas. Además, si los cocos son acumulados durante un tiempo, la probabilidad de creación de refugio para animales venenosos y roedores es mucho mayor [21].

En el tratamiento de los residuos, se pueden realizar procesos de triturado y/o prensado. En el prensado, se genera un líquido, llamado por distintos autores como LCCV (líquido de la cáscara del coco verde). El LCCV posee una elevada carga orgánica (60 a 70 g $DQO L^{-1}$), taninos (6 g L^{-1}) y conductividad eléctrica (8,8 $mS cm^{-1}$), además de macronutrientes como P, S, Na, K, Ca y Mg, y micronutrientes como Cu, Fe, Mn y Zn. Su disposición incorrecta puede llegar a afectar los cuerpos de agua receptores. Lo anterior es principalmente por el alto contenido de taninos condensados, que son resistentes a ataques microbianos y son tóxicos para muchos tipos de organismos. No obstante, el LCCV tiene el potencial como fuente de nutrientes para el crecimiento vegetal, así como para la producción de etanol. También se puede realizar un tratamiento biológico del LCCV, para el cual se ha planteado el diseño de sistemas como un reactor anaerobio de flujo ascendente (UASB) con un lecho de lodos, un sistema de lodos activados y un reactor biológico con hongos. La producción teórica de LCCV, para 13 200 pipas diarias, es de 11 038 $L día^{-1}$ [52]- [53].

Otro proceso involucrado en la valorización de los residuos es el lavado del polvo de coco. El polvo es obtenido producto de una serie de operaciones como triturado, clasificación y molienda. El material presenta una conductividad eléctrica elevada que, mediante un lavado, permite disminuir la cantidad de sales solubles. El efluente del agua de lavado es tratado en conjunto con el LCCV proveniente de la etapa de prensado [44]. No obstante, aún en caso de no realizarse un prensado, se debe analizar si el sistema de aguas residuales en el sitio de producción resulta eficiente para el tratamiento del agua. O bien, si el alcantarillado sanitario local es adecuado para la disposición de las aguas. El Cuadro 4.1 presenta la caracterización del LCCV.

Cuadro 0.1. Caracterización del líquido de la cáscara de coco verde (LCCV) [52].

Parámetro	Valor
DBO5	$4,12 \times 10^4 \text{ mg L}^{-1}$
DQO	$6,35 \times 10^4 \text{ mg L}^{-1}$
Taninos totales	$5,95 \times 10^3 \text{ mg L}^{-1}$
Azúcares totales	$4,51 \times 10^4 \text{ mg L}^{-1}$
Alcalinidad total	$1,01 \times 10^3 \text{ mg L}^{-1}$
pH	4,91
Conductividad eléctrica	$8,75 \text{ mS cm}^{-1}$
Amoníaco	746 mg L^{-1}
Nitritos	$0,42 \text{ mg L}^{-1}$
Nitratos	66 mg L^{-1}
Fósforo total	130 mg L^{-1}
Sólidos totales	$6,53 \times 10^4 \text{ mg L}^{-1}$
Sólidos fijos	$6,16 \times 10^3 \text{ mg L}^{-1}$
Sólidos volátiles	$5,91 \times 10^4 \text{ mg L}^{-1}$

1.10.3 Económico

La empresa de interés realiza un pago anual de ₡ 32 400 000 + IVA a otra organización para su gestión ambiental, la cual incluye tanto el transporte como el tratamiento de las pipas.

El análisis a nivel organizacional, ambiental y económico de la gestión de residuos de pipa mostró que se generan hasta 13 200 unidades de coco al día, que pueden tener una masa cercana a las 14,8 t y que podrían causar impactos negativos en el ambiente si no se les brinda una gestión adecuada. Otro aspecto por considerar en la gestión de un residuo como el coco es su transporte, por lo que a continuación se detalla más al respecto.

1.11 TRANSPORTE

En esta sección se analizarán diferentes escenarios para el transporte de los residuos de pipa. La gestión de los materiales podría realizarse en la provincia de Limón, misma región de donde proviene la materia prima de la empresa de interés. De igual manera podría hacerse en el GAM, cerca de las instalaciones de procesamiento de agua de pipa.

El transporte de los residuos a Limón presenta dos escenarios. El primero consiste en que la empresa de interés transporte el material al sitio de su gestión. Sin embargo, dicho lugar se encuentra alejado de la planta de producción. El segundo escenario se basa en el traslado de las instalaciones de producción de la empresa de interés. Estas se ubicarían en la misma región donde se producen la mayor parte de los cultivos de coco en Costa Rica, así logrando disminuir la distancia, tiempo y costo en el traslado de los frutos.

Para el primer escenario, entre la ida y la vuelta del medio de transporte, se recorrerían 185,2 km. En la ida, el camión estaría cargado de los residuos de coco, mientras que en la vuelta regresaría vacío. Este proceso se realizaría a diario, como producto de la cantidad de residuos acumulados.

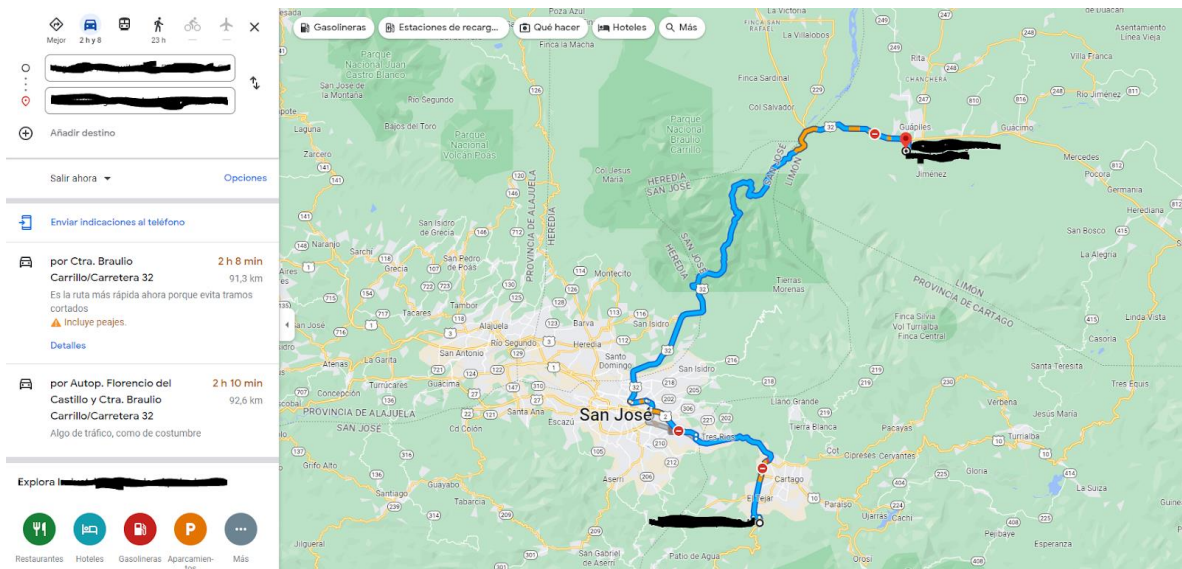


Figura 0.2. Distancia por recorrido para el transporte de residuos de coco verde.

En el segundo escenario, se desconoce la ubicación exacta de las posibles instalaciones de la empresa de interés, por lo que se estableció una distancia teórica de 25 km a la redonda de la planta de producción del sustrato agrícola. Al igual que en el primer escenario, el transporte de los residuos se realizaría a diario.

La empresa de interés no cuenta con un camión propio para el transporte de los residuos, por lo cual, se analizó el costo del alquiler a largo plazo del medio de transporte. El precio por viaje es dependiente de la distancia recorrida, del tiempo de carga de los residuos al camión, que en este caso se realiza a lo largo del día; de la masa a transportar, que puede ser de 13 a 15 toneladas diarias; y que el camión necesita equipo de volteo. Para el escenario del transporte desde el Gran Área Metropolitana a Limón, el costo es de ₡ 280 000 a ₡ 310 000 por viaje, mientras que, si se realiza dentro de la misma provincia, el precio es de ₡ 100 000 a ₡ 130 000 por viaje.

El costo del transporte dentro del GAM, considerando una distancia teórica de 25 km a la redonda de la empresa de interés, y las mismas circunstancias mencionadas antes, es igualmente de ₡ 100 000 a ₡ 130 000 por viaje.

El traslado de los residuos de pipa requeriría mayores recursos económicos si se realizara desde la empresa de interés hasta un sitio de gestión ubicado en la provincia de Limón. Los menores costos y tiempo de traslado se obtendrían si el transporte de los residuos se hiciera dentro de la misma región.

1.12 ALMACENAMIENTO DE LOS RESIDUOS DE PIPA

Para la producción de sustrato de coco verde se requiere terreno para realizar procesos como secado y almacenamiento. La empresa de interés, dependiendo de la producción, genera al día de 10 560 a 13 200 unidades de pipa. Para efectos de dimensionamiento, se tomará la máxima producción diaria.

1.12.1 Almacenamiento de las pipas enteras

El volumen que requieren las pipas enteras debe considerarse en el proceso de recepción y almacenamiento de estas [44]. Silveira [33] presenta que en $1 m^3$ se pueden almacenar hasta 300 unidades de coco verde. La autora también indica que la masa promedio de los frutos, post-extracción de agua es de 1,5 kg, la cual es mayor al promedio considerado en este estudio (1,12 kg). Debido las diferencias en masa y el hecho de que el artículo fue realizado en Brasil y no en Costa Rica, se analizó la capacidad de almacenamiento en $1 m^3$.

En una tarima rectangular con área de $0,96 m^2$, se lograron posicionar 54 pipas, sin poner unas encima de otras. Para $1 m^2$, se estimó que se pueden colocar 56 pipas. Además, se obtuvo una altura promedio de 15 cm para las frutas, lo que significa que se pueden apilar cerca de 7 pipas en 1 m. Con ello, se determinó que en $1 m^3$ se pueden disponer alrededor de 392 cocos verdes, un número considerablemente mayor al presentado por Silveira [31]. De este número, se puede observar que, en general, los frutos, a la hora de realizar el análisis, presentaron un tamaño menor a los cocos verdes utilizados para el estudio en Brasil. Es decir, entre menor sea el tamaño de las pipas, más van a caber en $1 m^3$.

Con una producción diaria de 13 200 unidades, se estima que en un día se ocuparían 34 m^3 , que serían 170 m^3 semanales (considerando 5 días de trabajo). Se estima el volumen hasta una semana laboral, debido a que Carrijo *et al.* [45] mencionan que las pipas deben ser almacenadas por el menor tiempo posible, porque su maduración puede dificultar su corte. Además, en su almacenamiento por una semana, se puede llegar a observar la presencia de moho en el interior del coco.



Figura 0.3. Pipa con moho en su interior.

En términos de terreno, si las pipas se apilan 2 m, el espacio necesario diario sería de $20,2 \text{ m}^2$, lo que se puede traducir a aproximadamente 100 m^2 para la acumulación durante una semana. Se sobredimensiona ligeramente por posibles variaciones en la generación de los residuos y otros imprevistos. El apilado a mayores alturas puede involucrar el uso de maquinaria como cargadores o tractores con pala cargadora, cuya compra puede representar gastos económicos adicionales.

1.12.2 Almacenamiento de las pipas trituradas

Con el triturado de los cocos como primera instancia, el terreno por ocupar es menor. Se determinó que en 1 m^3 se pueden disponer 832 pipas trituradas. Esta es una reducción en necesidad de espacio cercana al 53% cuando se compara con el volumen de los frutos enteros. No obstante, cabe mencionar que la cantidad acumulable varía con respecto al tamaño de los frutos. Si las pipas se apilan en 1 m, para una semana de secado, serían necesarios cerca de 81 m^2 . Mientras que para 90 días serían 1521 m^2 , aproximadamente. La acumulación de los frutos a esta altura involucra su mezclado por un mínimo de 1 o 2 veces al día, para asegurar que el material se seque.

En la literatura también se discute el espacio necesario que necesitan los cocos. Mattos *et al.* [44] indican que, por cada 10 000 cocos procesados diariamente, serán necesarios 100 m^2 para el secado y/o maduración de las fibras y el polvo, siendo esparcidas en capas de 5 a 10 cm sobre un piso de concreto. Lo que significa que, para 13 200 unidades de coco verde procesadas a diario, serían ocupados cerca 132 m^2 en un día y 1,2 ha en 90 días, que es el tiempo mínimo de maduración del polvo considerado en esta investigación. El apilado a dichas alturas aumenta el terreno necesario, pero disminuye el número de tiempos de volteo.

1.12.3 Almacenamiento de la fibra y polvo seco

El secado de los cocos triturados durante una semana permitió observar una reducción de masa cercana al 80% con respecto a la masa del fruto en su estado íntegro. Se determinó que la fibra seca requiere $40\text{ m}^3\text{ día}^{-1}$, mientras que el polvo 11 m^3 diarios. En comparación con la pipa triturada húmeda, que necesita $16\text{ m}^3\text{ día}^{-1}$, se establece que la fibra seca precisa un volumen considerablemente mayor de almacenamiento, no obstante, una fracción de su peso. Es decir, la masa de la pipa triturada húmeda es mayor que la de la fibra seca, sin embargo, el proceso de secado hace que se expanda el material, llegando a ocupar un volumen superior.

1.13 ANÁLISIS DE HUMEDAD, pH Y CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

Los resultados del análisis de humedad, pH y conductividad eléctrica de los residuos de pipa se muestran en el Cuadro 4.2. En el reporte de los datos, se presenta una incertidumbre expandida, calculada usando un factor de cobertura (k) de 2, con el cual se obtiene un nivel de confianza de aproximadamente 95%.

Cuadro 0.2. Valores de pH, humedad (%) y conductividad eléctrica ($\mu S cm^{-1}$) de los residuos de coco verde.

Número de lavados	0	1
pH	3,46±0,06	3,60±0,06
Humedad (%)	85,7±0,6	88,0±0,6
Conductividad eléctrica ($\mu S/cm$)	1389±40	423±12

Conviene enfatizar que los resultados de los análisis están sesgados por la extensión del proyecto en mano. Como mencionan Lomelí-Ramírez *et al.* [14] y Kampf y Fermino [15], existe una serie de variables que afectan la caracterización física y química de los residuos de coco verde. Por ejemplo, no fue posible conocer la época exacta del año en la que se cosecharon las frutas, así como la edad de estas. La localización geográfica de cosecha de las pipas sí es conocida (Guápiles y Sarapiquí, en la provincia de Limón). No obstante, por periodos lluviosos variables y no monitoreados en este estudio, es posible que se presenten resultados diversos a los que se hubiesen obtenido de una época de cosecha distinta. Lo mismo aplica para las diferencias por variedades de coco, debido que en la mayoría de los estudios no se especifica cuál es analizada.

Mattos *et al.* [44] proponen una serie de metodologías aplicables para la caracterización de materiales fibrosos, que también pueden ser determinantes en los resultados obtenidos. Sin embargo, se eligió el método de extracción del sustrato saturado propuesto por Liz y Carrijo [21]. Para realizar los análisis, las pipas fueron sometidas a un proceso de trituración, del cual se obtiene una parte fibrosa y otra polvorienta. Para los estudios de laboratorio, se trabajó con ambos componentes.

Ambas muestras, con 0 y 1 lavados, presentan un porcentaje de humedad semejante al reportado por la literatura, de un 85% [13]. Para la muestra con las fibras lavadas es importante recalcar que la humedad no va a ser un factor determinante. Por la naturaleza del proceso de lavado, es imposible que se logre drenar la totalidad del agua. Es decir, debido al agua de lavado, los valores de humedad siempre van a ser ligeramente superiores a cuando no se laven.



Figura 0.4. Muestra de coco verde triturado.

Las cáscaras de coco verde tienen la desventaja de tener valores muy variables en términos del pH y conductividad eléctrica, tal y como se mencionó anteriormente [21]. En esta investigación, se obtuvieron valores de pH bajos para las dos muestras de pipa analizadas (con 0 y 1 lavados). La literatura reporta valores de pH para el sustrato de coco verde lavado de 4,8; 5 y 6,4 [6], [46], [45]. Mattos *et al.* [44], reportan que el pH debería aumentar significativamente cuando se realiza un lavado, situación contraria a lo obtenido con las dos muestras analizadas en la presente investigación.

Los rangos de pH reportados en la literatura como los más adecuados para la mayor parte de las plantas, son variados. Avenza Álvarez [54] indican que la mejor disponibilidad de nutrientes se produce en sustratos con un pH comprendido entre 5,5 y 6,5. No obstante, de Liz y Carrijo [21] mencionan que en un rango de 5,0 a 6,0, la mayor parte de los nutrientes son fácilmente asimilables por las plantas.

Analizando la conductividad eléctrica para las fibras no lavadas, se encontraron valores menores que los reportados en la literatura bajo las mismas condiciones. Carrijo *et al.* [45],

presentan un valor de 2400 S cm^{-1} , mientras que Rosa *et al.* [6] de 4740 S cm^{-1} . Para las fibras lavadas, de igual manera se obtuvieron valores menores en comparación a los 1500 S cm^{-1} reportados [6]. Mattos *et al.* [55] comentan que un sustrato agrícola debe tener una conductividad eléctrica cercana a 1000 S cm^{-1} . condición que cumple el sustrato lavado. Indican los mismos autores que es probable que al añadir otros nutrientes, se aumente la salinidad del sustrato, por lo que la conductividad eléctrica debe ser menor a 500 S cm^{-1} .

En la literatura no existe un consenso con respecto a los valores de conductividad eléctrica adecuados para el crecimiento de plantas. Torres *et al.* [56], comentan que cuando se utiliza el método de extracción del sustrato saturado, una conductividad eléctrica de $0\text{-}750 \mu\text{S cm}^{-1}$ es muy baja y que los niveles de nutrientes pueden no ser suficientes para sostener un rápido crecimiento; que $2100\text{-}3500 \mu\text{S cm}^{-1}$ es un rango estándar para zonas radicales de la mayoría de las plantas, pero es un rango superior para plantas sensibles a sales; y que más de $6000 \mu\text{S cm}^{-1}$ son valores extremos, donde la mayoría de cultivos tiene problemas y se requiere inmediata lixiviación de sales. En tal caso, considerando que la conductividad eléctrica de las fibras analizadas va a aumentar con el agregado de otros nutrientes, el valor obtenido se encuentra dentro del rango adecuado para el crecimiento de plantas.

Los valores de pH y conductividad eléctrica fueron distintos a los presentados por otros autores, casi todos provenientes de Brasil. Por ello, es de importancia una caracterización completa de los residuos de pipa para Costa Rica, para poder evaluar el efecto de las diferencias geográficas, épocas de cosecha, variedades de la fruta, metodologías aplicadas y lluvias. Los parámetros analizados son de esencial importancia cuando se desean transformar los residuos de coco en sustrato agrícola.

1.14 PRODUCCIÓN DE FIBRA Y POLVO

El sustrato de coco está compuesto por una fracción fibrosa y otra polvorosa. Nunes *et al.* [42] presentan una ecuación y un factor de equivalencia que permiten calcular la masa de fibras equivalentes a la cantidad de residuos generados. Es decir, la posible producción de fibras de coco verde basadas en la cantidad de desechos. El factor de equivalencia fue basado

en la información de Bitencourt y Pedrotti [57], que mencionan que, por unidad de coco, se puede producir un 25% de fibra. Nunes *et al.* [42] consideraron que una unidad de coco verde sin agua es de 1,5 kg, el cual es un valor mayor al del presente trabajo. Multiplicando la masa de la fruta por el 25% se obtiene el factor de equivalencia. Por lo tanto, para el estudio en mano, se volvió a estimar el factor de equivalencia con la masa de 1,12 kg, obteniéndose un valor de 0,28 kg/fruta. Una vez corregido el factor de equivalencia z , se procede a aplicar la ecuación:

$$Tf = z \times Qc$$

donde:

Tf: Masa de fibras equivalente en kg

z : Factor de equivalencia para la masa de fibra de un coco = 0,28 kg/fruta

Qc: Número de cáscaras de coco verde

Al aplicar la ecuación, se obtuvo que la posible producción diaria de fibras de coco verde sería de 3,7 t/día, que son 73,9 t/mes y 887,0 t/año. El modelo presentado por Nunes *et al.* [42] tiene la desventaja de no considerar la producción de polvo. No obstante, Rosa *et al.* [6] declaran que después de los procesos de molienda y secado, el rendimiento de polvo con relación a la masa inicial del fruto es del 11% al 13%, teniendo una humedad del 17% al 20%. Bajo este principio, la producción diaria de polvo de coco sería de 1,6 t/día, que son 32,5 t/mes y 390,3 t/año.

Ambos estudios fueron realizados en Brasil y no en Costa Rica, por lo que existe la posibilidad de que se presenten diferencias en las características físicas de los frutos.

Por lo tanto, se procedió a realizar el cálculo para los cocos de la empresa. Posterior al triturado y secado de los frutos, se observó que se perdía del 60% al 80% de la masa original del fruto. Dicho valor se debe a la pérdida de humedad en las pipas, producto del secado durante una semana. También se logró determinar que, del material seco y solamente triturado, cerca del 70% correspondía a fibras y 30% a polvo. El proceso de clasificación se realizó manualmente, debido a que los tamices vibratorios disponibles no permitieron la

separación de los materiales. Por ello, es recomendable el uso de tamices rotatorios para su clasificación, considerando que no se poseía máquina clasificadora.

Marafon *et al.* [17] presentan la misma proporción de fibras y polvo a la obtenida en el análisis realizado. No obstante, Mattos *et al.* [55] indican una relación inversa a la obtenida aquí, es decir, un 70% de polvo y un 30% de fibra. Dichos autores aplican el triturado, prensado y clasificación a las pipas, por lo que puede ser la raíz de la diferencia en la cantidad de polvo y fibra.

Si se considera la pérdida del 80% de la masa original, así como una proporción de 70% de fibra y 30% de polvo, la producción diaria para 13 200 unidades de coco verde sería de 2,1 t/día de fibra y 0,9 t/día de polvo. Las cantidades son obtenidas cuando solo se han realizado los procesos de triturado, secado y clasificación.

En comparación con lo estipulado por Nunes *et al.* [42] y Rosa *et al.* [6], se observa que los porcentajes con respecto a la masa original del fruto varían. Para lo analizado, el polvo representa el 6% de la masa original (en comparación con 11%), mientras que la fibra un 14% (en comparación con 25%). La divergencia en los datos podría ser producto de la naturaleza de los frutos, así como el proceso aplicado para la obtención de los materiales.



Figura 0.5. Muestra de coco verde triturado.



Figura 0.6. Polvo seco de coco verde.

1.15 PROCESO DE PRODUCCIÓN DE FIBRA Y POLVO DE COCO VERDE

Existe una variedad de procesos de producción de polvo y fibra de coco verde que han sido reportados en la literatura. Mientras que todos los autores coinciden en que el primer paso en su confección es la trituración, difieren en el orden de otros, así como la inclusión de procesos que algunos no plantean. Por lo tanto, en el Cuadro 4.3, se presentan los procesos planteados por una serie de investigadores para la producción del sustrato (polvo) y fibras.

Cuadro 0.3. Procesos para la producción de polvo o sustrato de coco verde.

Proceso	Autor
Trituración	[6], [13], [44], [55]
Secado	[6], [13], [44], [55]
Prensado	[44], [55]
Clasificación	[44], [55]
Lavado	[13], [44], [55]
Compostaje o fermentación	[21], [25], [44]-[46], [55]
Molienda	[6], [13], [44], [55]
Tamizado	[6], [13], [44], [55]



Figura 0.7. Procesos para la producción de fibra de coco verde [44], [55].

1.15.1 Trituración

En esta etapa, una máquina trituradora procesa las pipas, obteniéndose fibra y polvo, así como restos de albumen y endocarpio triturados, todos con la humedad original de la fruta [53]. Dependiendo de las características de la máquina, las cáscaras de coco verde pueden ser incorporadas enteras o cortadas. La mayor parte de las máquinas funcionan con cuchillas, estacionarias o giratorias en disco [13],[44],[55]. En el mercado costarricense existen trituradoras específicas para cocos verdes [58], con capacidad de triturado de 800 a 1000 cocos/h.

1.15.2 Prensado

Las cáscaras de pipa poseen una alta concentración de sales, las cuales resultan tóxicas para el cultivo de varias especies vegetales, debido al ajuste osmótico como producto del estrés salino. El prensado permite disminuir tanto la humedad como la salinidad en las cáscaras de coco verde [44]. Se han reportado disminuciones de $4,7 \text{ dS m}^{-1}$ a $1,3 \text{ dS m}^{-1}$ en conductividad eléctrica y humedad de 80% a 50% después de aplicar el proceso [44], [55]. Como producto del prensado se obtienen las cáscaras desintegradas y el denominado líquido de la cáscara de coco verde (LCCV), el cual representa cerca del 30% de la masa inicial de las cáscaras trituradas. Las pipas trituradas son prensadas por una prensa de bandas o rodillos. La compresión mecánica es uno de los procesos aplicables para la reducción de salinidad en el coco verde, no obstante, también se puede realizar el lavado del material.

1.15.3 Clasificación

Este proceso es planteado únicamente por Mattos *et al.* [44],[55]. Los autores hacen referencia a la clasificación como una fase realizada por una máquina clasificadora y no un tamiz industrial. Más avanzado el proceso de producción, realizan el tamizado de los materiales. Es decir, plantean tanto la clasificación como el tamizado de las fibras y polvo de coco.

Posterior al prensado, las fibras se separan del polvo en una máquina clasificadora con un rollo de cuchillas fijas y una placa perforada. El material es arremolinado a lo largo del eje de la máquina, lo que hace que el polvo caiga a través de la placa perforada y la fibra salga al final del recorrido. Una vez que se ha seleccionado, el polvo cae en la base de la máquina y puede recibirse en el suelo o cajas [44].



Figura 0.8. Maquinaria para el procesamiento de los residuos de coco verde [44].

La empresa metalúrgica brasileña FORTALMAG diseña y comercializa maquinaria para el procesamiento de las cáscaras de coco verde. La máquina realiza los procesos de triturado, prensado y clasificación. La trituración se realiza por medio de cuchillas fijas, mientras que el prensado se desarrolla mediante una prensa rotativa horizontal. Para la selección, una serie de martillos helicoidales fijos y una placa perforada permiten la clasificación del polvo y el material fibroso. Mattos *et al.* [44], [55] plantean la producción de sustrato y fibra basada en la existencia de dicha maquinaria, por lo que la información presentada por los investigadores está delimitada por el uso de esta.

1.15.4 Lavado

El lavado de las pipas es eficiente en la remoción de las sales solubles de la fruta y su consecuente reducción de conductividad eléctrica. Dependiendo del cultivo en el que se vaya a aplicar el sustrato, es necesaria la disminución de su conductividad eléctrica. El lavado de las pipas trituradas puede ser un proceso que sustituya al prensado, pero también complementarlo [6], [44]. Rosa *et al.* [6] no realizan el prensado de los cocos, solamente su lavado; mientras que Mattos *et al.* [44] realizan ambos procesos. Los últimos además reportan una conductividad eléctrica de $1,3 \text{ dS m}^{-1}$ después del prensado de las frutas. Es de interés notar que dicho valor es cercano a la conductividad eléctrica inicial analizada en este estudio, $(1389 \pm 40) \mu\text{S cm}^{-1}$, lo que significa que la salinidad para los cocos verdes analizados en Brasil es mayor. Por ello, para la presente investigación se enfoca solamente en el lavado de los cocos verdes, debido a la extensión del estudio, así como la falta de infraestructura y presupuesto para el tratamiento del LCCV.

Este proceso se realiza en tanques de fibra de vidrio o mampostería impermeabilizada con agua potable, libre de patógenos y con baja conductividad eléctrica. Dichos tanques se llenan de material hasta la mitad de su volumen, luego se agrega agua hasta llenar completamente el espacio. Cuando el tanque se encuentra lleno, se debe revolver el contenido con ayuda de una varilla de metal o madera. El coco debe permanecer en el agua durante 15 minutos y posteriormente se remueve la tapa de salida de agua del tanque. En la salida de agua debe estar presente un elemento filtrante para evitar la pérdida del polvo. Se reportan buenos resultados al trabajar con capas de 30 a 50 cm de fibra y polvo de coco. Además, los tanques de lavado deben estar ubicados en un lugar cercano al patio de secado, para facilitar el transporte del material húmedo [44].

Se puede realizar el lavado del material posterior a la etapa de clasificación [6], [44].

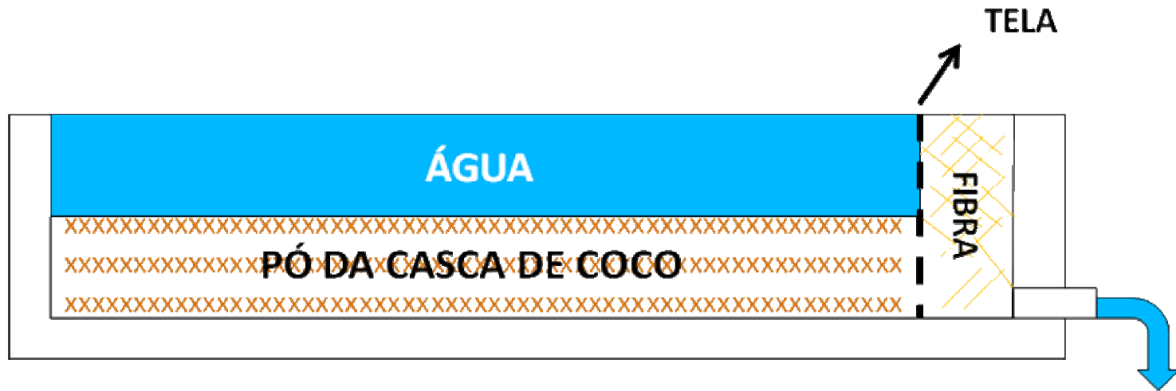


Figura 0.9. Esquema del tanque de lavado del polvo de pipa [44].

1.15.5 Maduración, compostaje o fermentación

El polvo de cáscara de coco verde posee una alta relación C/N (74:1 para sustrato no lavado [21]), lo que sugiere una baja velocidad de degradación. Además, los altos contenidos de celulosa y lignina le dan al material una buena estabilidad [55]. En los días posteriores a su producción, todavía se observa actividad fermentativa en el polvo. Si se llega a utilizar el polvo en este período, se pueden dar problemas con la inmovilización de nutrientes y muerte de raíces, como producto de las altas temperaturas durante la fermentación. Con el objetivo de evitar estos problemas, el polvo se apila y voltea semanalmente durante 60 días, o hasta que la temperatura interna de la pila de polvo se equilibre a temperatura ambiente [44]. Mattos *et al.* [55] proponen un tiempo de maduración de 30 a 40 días, lo cual implica una menor necesidad de terreno a la propuesta por Carrijo *et al.* [25], que es de 90 días. La temperatura puede medirse con un termómetro de varilla y se debe tomar al menos tres veces a la semana [44].

En este proceso de fermentación controlada, se puede utilizar urea como fuente de nitrógeno para acelerar la degradación de los carbohidratos y lípidos que están más disponibles en el material, para así alcanzar un punto de estabilización más rápidamente [55]. En otras palabras, la adición de 1% de urea permite mejorar las características físicas y químicas del sustrato, en particular la relación C/N, que es alta [45]. La urea se puede utilizar en una proporción de 2 gramos por cada kilogramo de polvo de pipa (50% de humedad). La manera más sencilla de distribuirla es diluyendo la urea en agua y regando en el sustrato por mientras

se esparce el patio de secado. Esto debe realizarse utilizando la menor cantidad de agua posible para distribuir uniformemente la urea. Una vez realizada la aplicación, se debe apilar el polvo, debido a que la exposición al sol facilita la pérdida de nitrógeno por volatilización, lo cual no es deseable [44].

Algunos autores refutan la necesidad absoluta del compostaje del sustrato de coco verde, mencionando que solo es necesaria cuando va a ser utilizado para la producción de almácigos o plántulas [25],[45]. No obstante, se ha evidenciado que el compostaje del polvo de coco verde permite aumentar el pH y disminuir la conductividad eléctrica [46], características que resultan de principal interés en la calidad del sustrato.

1.15.6 Molienda

La molienda es complementaria al proceso de trituración. Mientras que en la trituración se tratan los grandes trozos de material, en la molienda se busca reducir el tamaño de estos. En este proceso se pueden obtener tamaños de partícula del orden de 1 mm. Existe una serie de modelos de molinos, como de barras y martillos [59]. Rosa *et al.* [13] utilizan un molino granulador de cuchillas. Mattos *et al.* [44] indican que el polvo obtenido en la clasificación aún posee una cantidad importante de fibras de variados tamaños, lo que puede generar problemas para el desarrollo de las raíces de las plantas. Por lo tanto, hacen uso de un molino de cuchillas paralelas que reduce el tamaño de las fibras a menos de 2 cm de longitud.

El proceso de molienda puede realizarse con el secado previo de las cáscaras de pipa trituradas. En este caso, la anterior reducción de humedad permite obtener un material más homogéneo durante la molienda, con menor granulometría. También se puede hacer la molienda con el material triturado húmedo, sin embargo, la granulometría del polvo resulta mayor [6]. Los molinos tienen mayor eficiencia cuando son alimentados con materiales con humedad menor al 50%, entre menor humedad, mejores resultados [44].

Producto de la molienda se obtiene una fracción fibrosa y otra de polvo [6].



Figura 0.10. Molienda de las cáscaras de pipa [13].

1.15.7 Tamizado

La granulometría del sustrato va a depender del cultivo en el que se vaya a aplicar. Por ello, se deben conocer las necesidades específicas de los compradores o clientes. Por ejemplo, para la producción de almácigos se requiere un sustrato fino, compuesto solamente por polvo. Para plantas ornamentales, hortalizas y cultivos en saco, el sustrato debe tener una granulometría más gruesa, donde la presencia de pequeñas fibras puede evitar problemas de aireación [44].

Para el polvo, Mattos *et al.* [44], [55] establecen que los tamaños de abertura de malla que funcionan para la mayor parte de los sustratos son de 3, 5, 10 y 20 mm. Estos pueden utilizarse tanto en tamices rotatorios como vibratorios. Dichos autores definieron que las aberturas de malla adecuadas al sustrato obtenido de su proceso fueron de 2,5; 5 y 7,5 mm. Rosa *et al.* [6],[13] recalcan que el tamaño de las partículas de polvo también va a depender de procesos anteriores, como el secado y la molienda. Dichos investigadores no hacen una

clasificación previa del polvo y la fibra, sino que muelen las fracciones en conjunto. Con ello obtienen un producto granulado y fibroso. Definen que una malla con abertura de 4 mm permite separar las fibras del polvo. Este proceso presenta la desventaja de que las fibras obtenidas son muy cortas, teniendo menor oportunidad de comercializarse en el sector agroindustrial. Se observó que cuando se vende fibra de coco, el producto siempre tiene un largo muy superior a los 4 mm. Las fibras cortas podrían incorporarse al sustrato a comercializar, no obstante, va a depender de las necesidades del cliente.

Cuadro 0.4. Granulometría del polvo de coco verde.

Malla Tyler	Porcentaje de polvo de coco verde
< 9	13%
9-20a	36%
20-32b	22%
32-60c	20%
>60	9%

(2,0 – 0,841)^a

(0,841 – 0,500)^b

(0,500 – 0,250)^c

El Cuadro 4.4 muestra la granulometría del polvo obtenido por Rosa *et al.* [13] después de triturar, secar y moler el coco verde. Solamente el 9% del total del polvo analizado presenta una granulometría menor a 0,250 mm, mientras que el 36% tiene un tamaño entre 2,0 y 0,841 mm.



Figura 0.11. Fibra y polvo de coco verde después de una molienda en conjunto.

1.15.8 Secado

La reducción de humedad del polvo y fibra de coco verde se puede realizar en diferentes etapas de su producción, además, el tiempo de secado es variable. Rosa *et al.* [13] proponen dos períodos. El primero, denominado pre-secado, se realiza justo después del triturado del coco, durante 4 días y con volteado diario del material. Este proceso permite reducir la humedad y facilitar la molienda. Después de la molienda y según la especificación final del producto, el material puede seguir secándose al sol. Los autores mencionan que, si el producto va a ser comercializado en sacos, la humedad puede ser de 15% a 25%. En el caso de que se comercialice prensado (en ladrillos), el material no debe tener una humedad superior al 30%. Con un tiempo de secado de 4 días, los investigadores obtienen un material con 20% de humedad. No obstante, el tiempo de secado para obtener la humedad deseada es dependiente de factores como la cantidad de sol y la humedad ambiental.

El proceso de secado puede realizarse antes de la molienda del producto. Esto permite conseguir un polvo más homogéneo y con una granulometría menor. Sin embargo, también

se puede hacer después de la molienda, obteniéndose un material más grueso y aglomerado [6].

Al secar el material con el sol, se recomienda no dejarlo expuesto a la intemperie durante la noche, debido a que se puede rehumedecer [44]. Por las mismas razones, se debe exponer bajo techo sobre piso de concreto limpio y aireado [45].

En el proceso de producción del sustrato de pipa, se pueden presentar microorganismos e insectos que afectan la calidad del producto final. Para ello, se recomienda el tratamiento térmico del material, mediante secadores rotatorios continuos o secadores de flujo concurrente. Una temperatura de 80°C durante 20 minutos resulta adecuada para la descontaminación y secado. Al trabajar con una mayor temperatura, se disminuye el tiempo del proceso. En la elección de la maquinaria, se debe considerar la capacidad de trabajo tanto con polvo como material fibroso [44].



Figura 0.12. Secado del sustrato de coco [13].



Figura 0.13. Secador rotativo [44].

1.15.9 Reclasificación

La clasificación o separación inicial de las fibras y el polvo de coco puede ser imperfecta, obteniéndose una fracción de fibras cortas en el polvo, así como polvo en las fibras más largas [44]. La presencia de un material en el otro disminuye su calidad, por lo que un proceso de reclasificación puede ser necesario. En las ocasiones que el cliente lo requiera, las fibras más pequeñas pueden ser incorporadas al polvo para obtener un sustrato de mayor granulometría. Mattos *et al.* [44] plantean la reclasificación de los materiales con una abertura de malla de 3 mm.

1.16 PROCESO SUGERIDO PARA LA VALORIZACIÓN DE LA FIBRA Y POLVO DE COCO VERDE

En la sección anterior se expusieron los pasos establecidos en la literatura para el aprovechamiento de la fibra y el polvo de coco verde. No obstante, se presenta el problema de que algunos investigadores buscan valorizar solamente el polvo y no la fibra del coco [6],[13]. Mattos *et al.* [44] son los únicos autores en proponer un proceso para el aprovechamiento de ambas partes. Al usar maquinaria no fácilmente disponible en Costa Rica, así como sugerir el prensado de los cocos, que crea otro problema ambiental fuera del alcance del presente proyecto; no resulta adecuada la reproducción idéntica de su proceso. Por lo tanto, se plantea un proceso que se adecúe a las circunstancias de la investigación.

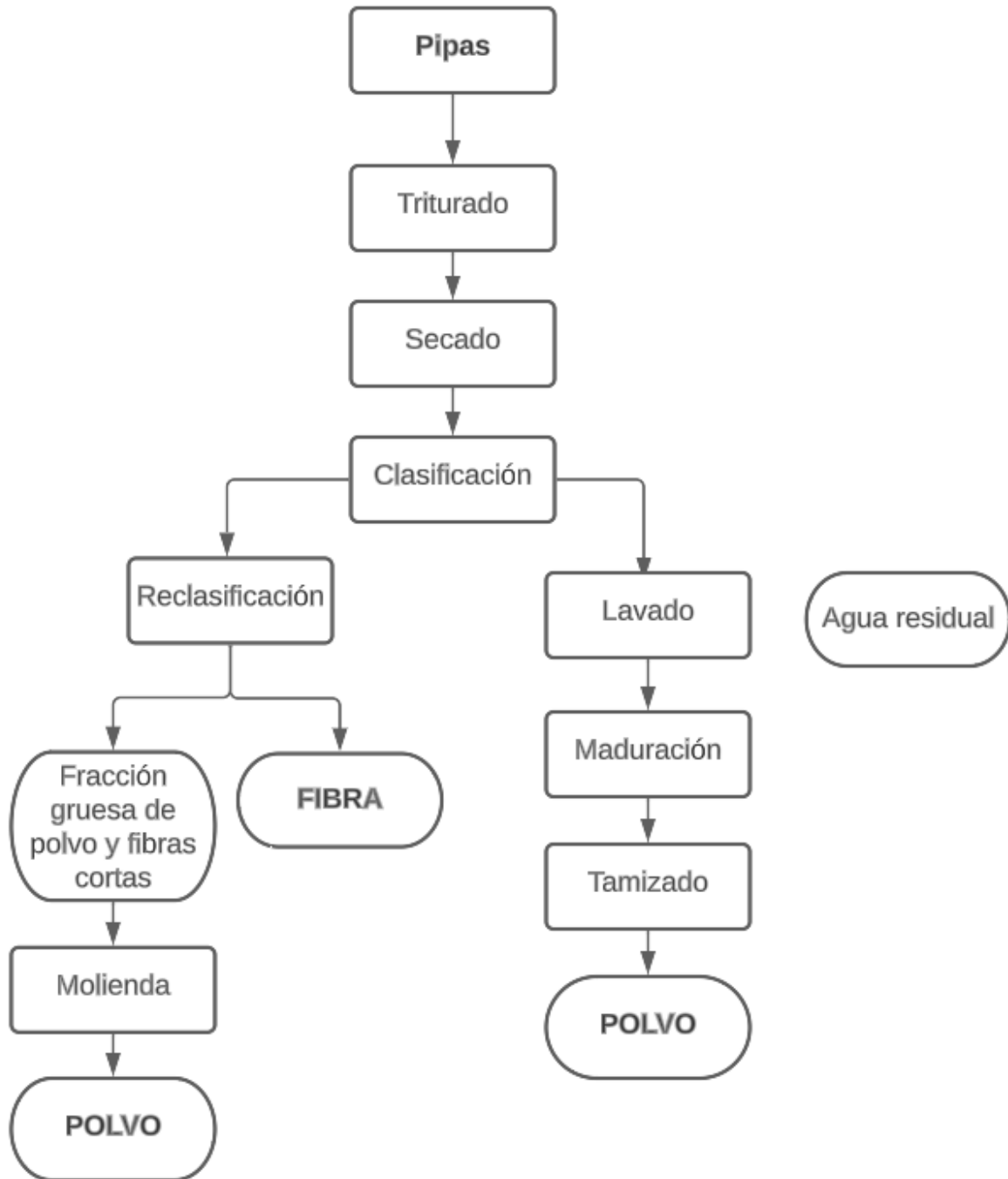


Figura 0.14. Procedimiento para la obtención de fibra y polvo de coco verde.

1.16.1 Triturado

El triturado de los cocos verdes se debe realizar a diario, debido a la cantidad de frutos que se generan al final del día laboral. Además, su acumulación por varios días puede requerir mucho espacio. La maquinaria debe permitir que los cocos se puedan triturar enteros, en virtud de que a los frutos solo se les hace un pequeño corte para extraer el agua.

1.16.2 Secado

El tiempo de secado de los cocos triturados al aire libre va a depender de la cantidad de sol, así como la presencia de lluvias. Se observó que un periodo de 4 a 7 días resulta adecuado para obtener el material con una humedad considerablemente menor a la inicial. Si el coco va a ser acumulado en pilas, se debe hacer un volteo diario, para asegurar un secado relativamente uniforme. Es de gran importancia que el secado “natural” se realice sobre piso de concreto o piedras. Esto es debido a que el contacto con césped o parecidos puede humedecer o contaminar el producto.

En el caso de presencia de lluvias o falta de espacio, se puede hacer uso de un secador. El tiempo de secado variará con respecto a las especificaciones de cada equipo.

1.16.3 Clasificación

Los cocos verdes presentan una humedad cercana al 85%, que puede llegar a dañar la maquinaria clasificadora no especializada para los frutos en esta etapa de madurez. Las clasificadoras con mayor disponibilidad en el mercado se basan en el principio de introducir el coco maduro entero. Seguidamente, la máquina separa las fracciones de fibra y polvo, mediante una serie de mecanismos específicos para cada instrumento.



Figura 0.15. Máquina clasificadora de polvo y fibra de coco [60].

Por ello, se plantea la clasificación del polvo y la fibra posterior al triturado y secado de los cocos. Para la separación de las fracciones puede utilizarse un tamiz rotatorio como los de las Figuras 4.16 y 4.17.

Como producto del triturado y secado, las fibras tienden a aglomerarse, acumulando polvo que se puede utilizar como sustrato agrícola. Además, la presencia de un alto contenido de polvo en las fibras empobrece la calidad del producto. Para desaglomerar, se pueden emplear rastrillos antes de que el material ingrese al tamiz. En este paso se genera material particulado muy fino, por lo que el uso de material de protección como mascarillas y lentes, es esencial para las personas trabajadora.



Figura 0.16. Tamiz rotatorio 1 [60].



Figura 0.17. Tamiz rotatorio 2 [60].

1.16.4 Lavado

1.16.4.1 Métodos de lavado del polvo de coco

Para la presente investigación se plantean dos métodos para el lavado del polvo de coco verde. Uno de ellos es una pileta, mientras que el otro es una máquina centrífuga. El método del tanque o pileta es ampliamente utilizado en la industria del sustrato de coco [13],[44]. La centrifugadora ha sido utilizada para el lavado de fibras vegetales en el Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción (CIVCO) del TEC.

1.16.4.1.1 Dimensionamiento del tanque de lavado

El tanque de lavado de las fibras y polvo de pipa fue dimensionado de acuerdo con las especificaciones planteadas por Mattos *et al.* [44]. Para 10 000 cocos/día son necesarios 8 m^2 de tanque, por lo que, para 13 200 pipas diarias, las dimensiones de la pileta de lavado son de 10,6 m^2 , con una profundidad de 1,2 m. De esa profundidad, 0,2 m son destinados como borde de la pileta, mientras que el resto es para su llenado. Además, se plantean 4 lavados diarios.

Si la mitad del tanque se llena con agua, significa que el volumen de agua necesario por lavado es aproximadamente de 5,3 m^3 . Al mes, considerando 5 días de trabajo semanales, el consumo de agua se traduce a 422,4 m^3 .

1.16.4.1.2 Dimensionamiento de la centrífuga

Las dimensiones de la centrífuga estuvieron basadas en la masa de polvo sin comprimir que puede ser almacenada en 1 m^3 (0,15 t m^{-3}), así como la aplicación de 8 lavados diarios al polvo generado en un día. De igual manera se consideró lo estipulado por Mattos *et al.* [44], que indican que se necesitan partes iguales de polvo y agua. La máquina consta de un tambor interno y un tambor externo. El interno se llena hasta un 75% de su capacidad total, para evitar daños al equipo y pérdida de material. Considerando una producción diaria de 0,9 t de polvo, el tambor interno de la centrífuga debe tener un volumen de 1,9 m^3 , mientras que el externo de 3,2 m^3 .



Figura 0.18. Centrifuga modelo.



Figura 0.19. Tambor interno y externo de la centrifuga modelo.

1.16.4.2 Colecta de agua de lluvia para el lavado

La colecta de agua de lluvia para uso en las instalaciones es planteada por Duran [61]. Con el objetivo de lixiviar sales solubles, algunos productores de sustrato de coco maduro permiten que el material se “lave” con agua de lluvia. No obstante, al aplicar esta última técnica puede resultar complejo conocer si el material ha sido lo suficientemente lavado. De igual manera, si las lluvias son prolongadas, se pueden desarrollar una serie de dificultades logísticas. Por ello, se propone la colecta y uso de agua de lluvia para el lavado del polvo.

El Caribe costarricense está caracterizado por tener clima lluvioso, con lluvia media anual que varía entre 2300 mm y 4860 mm. Mientras que las subregiones del Valle Central

presentan climas variados, desde De Sequías hasta Lluvioso de Altura, con lluvia media anual que varía de 1950 mm a 2820 mm [62].

Para el análisis de potencial de recolección de agua de lluvia se considerarán dos escenarios. El primero atiende a que la transformación de los residuos de pipa se realizará en la provincia de Limón, el segundo cuando se hace en la Meseta Central.

El potencial de agua promedio que se puede recolectar en un año se puede calcular con la siguiente fórmula:

$$VA = CE \times ArCap \times CL$$

Donde:

VA: Volumen de agua que puede ser recolectado (L/año).

CE: Coeficiente de escurrimiento. Es la relación entre el volumen de agua llovida y el volumen de agua escurrida. Es dependiente de factores como temperatura, tipo de superficie, entre otros [63].

ArCap: Área efectiva de captación. Es el área destinada para que el agua de lluvia precipitada sobre ella sea conducida para su almacenamiento y aprovechamiento [63].

CL: Cantidad de agua de lluvia (mm anuales). Los milímetros de precipitación también representan los litros de agua que llueven al año por m^2 , es decir, $L/año/m^2$ [63].

El coeficiente de escurrimiento utilizado es de un 80%, debido a que aplica para una gran variedad de casos y materiales [63]. Además, se asume que el área efectiva de captación en las instalaciones es de $200 m^2$.

En la Vertiente del Caribe se puede esperar captar $777,6 m^3/año$, mientras que en el Valle Central $322,6 m^3/año$. El tiempo de abastecimiento del agua va a ser dependiente del sistema instalado para el lavado del polvo. La pileta de lavado requiere un volumen de agua mensual de $422,4 m^3$, por lo que la lluvia recolectada podría abastecer 1,8 meses en el Caribe y 0,8 meses en el Valle Central. Por otro lado, la centrífuga necesita un volumen de $74,65$

m^3 al mes, por lo que la lluvia recolectada abastecería 10,4 meses en el Caribe y 4,3 meses en el Valle Central.

Los resultados presentados anteriormente representan una estimación del agua de lluvia que puede ser recolectada. Para obtener valores más específicos se deben considerar aspectos como cambios en el ciclo hidrológico causados por el cambio climático. La presencia de otra fuente de agua para el proceso de producción es indispensable, debido a que la colecta de agua de lluvia es aleatoria y no controlable [65].

1.16.5 Maduración o compostaje

El polvo de coco puede compostarse, mientras que las fibras son solamente sometidas a un periodo de secado. Por ello, se propone el proceso después de la separación de los materiales. Para el presente caso, se va a plantear la obligatoriedad de la maduración del sustrato por un periodo mínimo de 90 días. Este tiempo permite mejorar las características químicas del producto [46]. Para el caso del coco maduro, se han observado periodos de compostaje hasta por años, por lo que se supone que también es aplicable para el coco verde [61].

También se puede considerar el uso de urea para acelerar el proceso de maduración. A pesar de que no es una técnica ampliamente utilizada para el sustrato de coco, permite reducir el tiempo de maduración a 60 días [44]. Esto también trae el beneficio de la disminución del tamaño del terreno donde se realiza el proceso, tal y como se mencionó anteriormente. De acuerdo con las indicaciones de Mattos *et al.* [44], si el polvo posee una humedad del 50%, se necesitarían 2 g de urea por kg de polvo. Por lo tanto, para 18 000 kg mensuales de polvo de coco verde, se precisarían 36 kg de urea. En el mercado se encuentra urea en una presentación de 45 kg, por lo que se utilizaría el 80% del saco mensualmente. El saco de 45 kg tiene un costo de ₡ 21 475 (\$39,88 al 25 de agosto del 2023) [66].

1.16.6 Tamizado

Para la elección del tamaño de abertura de malla necesaria para la clasificación del polvo de coco, se realizó una prueba granulométrica (Cuadro 4.5). El polvo analizado no fue sometido a una molienda, solamente se separó del material fibroso seco.

Cuadro 0.5. Determinación de la granulometría del polvo de coco verde.

Tamiz N°	Abertura (mm)	% Retenido
7	2,80 mm	48,9
8	2,36 mm	3,3
10	2,00 mm	5,3
12	1,70 mm	3,1
16	1,18 mm	9,7
Fondo	-	29,7
Total		100

Como se puede notar, cerca del 50% del material retenido presenta una granulometría mayor a los 2,80 mm. Además, tal y como se observa en la Figura 4.20., una parte importante de lo retenido son pedazos de endocarpio del coco. Esta fracción puede ser aprovechada con la granulometría que presenta, o bien puede someterse a un proceso de molienda que permita disminuir su tamaño. En general, la molienda aplica para toda fracción a la que se le desee reducir su granulometría.

La fracción con tamaños de gránulos menores a 1,18 mm también presentó un porcentaje de retención de polvo importante. En esta casi no se observan fibrillas, a diferencia de lo obtenido en la malla de abertura de 1,70 mm. Los demás tamices acumularon menos del 10% del total del material analizado, no obstante, representan una fracción intermedia que no se puede obviar.

Por lo tanto, considerando los resultados del análisis granulométrico y la capacidad de encontrar en el mercado aberturas de malla de números no exactos para coladores rotatorios, se define que tamices con abertura de 3, 2 y 1 mm resultan adecuados para el polvo de coco verde.



Figura 0.20. Fracción de coco retenida en una malla de 2,80 mm de abertura.



Figura 0.21. Fracción de coco con granulometría menor a 1,18 mm.

1.16.7 Molienda

Aún después de la clasificación, el polvo puede presentar fibras de varias longitudes. Estas aumentan la densidad y reducen la capacidad de aireación del sustrato, que puede generar problemas para el desarrollo de las raíces de las plantas. Mediante el uso de un molino que disminuya el tamaño de las fibras a menos de 2 cm, se puede mejorar la estabilidad de la mezcla de polvo con fibras [44].

1.16.8 Reclasificación



Se plantea la reclasificación de los materiales para separar fibras cortas y trozos de coco de las fibras más largas. En este proceso, un tamiz con abertura de malla de 2 cm resultaría adecuado para su separación. Las fracciones de fibras cortas y trozos de coco pueden someterse a una molienda, con el objetivo de disminuir su granulometría y poder incorporarse al polvo. Mediante este procedimiento también se obtendrían las fibras largas sin una cantidad importante de polvo.

Los procedimientos planteados para la obtención de polvo y fibra de coco verde son la trituración, secado, clasificación, lavado, maduración, tamizado, reclasificación y molienda. Estos corresponden a lo discutido en la literatura, así como adaptado a las condiciones específicas de la empresa, maquinaria fácilmente disponible y condiciones meteorológicas regionales.

1.17 COSTOS DE MAQUINARIA PARA LA PRODUCCIÓN DE POLVO Y FIBRA DE COCO VERDE

La incorporación de tecnología para la gestión de los residuos de pipa permitiría la producción de polvo y fibra. El Cuadro 4.6 muestra información acerca de los principales equipos para el procesamiento de los productos.

Cuadro 0.6. Información de alguna maquinaria requerida para la producción de polvo y fibra de coco verde.


Maquinaria	Detalle	Inversión
<p>Trituradora (Opción 1)</p>  <p>Figura 0.22. Fracción de coco con granulometría menor a 1,18 mm [58].</p>	<p>Trituradora de coco TRAPP modelo TRC-40 con producción de 800 a 1000 cocos/hr. Permite triturar cocos verdes y secos. Funciona con motor monofásico o trifásico, no requiere usar gasolina.</p>	<p>\$ 1 779,45 x 2 = \$ 3 558, 9</p>
<p>Trituradora (Opción 2)</p>  <p>Figura 0.23. Fracción de coco con granulometría menor a 1,18 mm [67].</p>	<p>Vagón para troceado/mezclado SEKO modelo SAMURAI 450/70 con capacidad para 7 m3. Originalmente para la producción de alimento de ganado, también se utiliza en el triturado de cocos.</p>	<p>\$ 27 000 + IVA</p>

Continuación del Cuadro 4.6

Maquinaria	Detalle	Inversión
<p>Secadora</p>  <p>Figura 0.24. Fracción de coco con granulometría menor a 1,18 mm [68].</p>	<p>Secadora rotatoria BENDIG modelo SG-60 con capacidad para 60 fanegas (120 qq húmedo); Incluye secado en 24 horas, quemador, ventilador, bases, motorreductor con piñones, panel eléctrico. Para su funcionamiento se debe incluir un horno de fuego indirecto y ductos de conexión.</p> <p>Horno de fuego indirecto modelo HB-10L, para calentar 10.000m³/hr de aire hasta 70°C. Utiliza cascarilla de café y leña como combustible, con un consumo aproximado de 24-28 kg/hr. Incluye termómetro, motor 0,5HP y tolva para depósito de cascarilla para 140kg. Suple calor para una secadora SG-60 o 60 fanegas. Temperatura máxima 55-60°C.</p> <p>Ductos para la conexión del horno al Ventilador y a la Secadora.</p>	<p>\$ 65 709,50</p>
<p>Molino de cuchillas</p> <p>Tomblor giratorio para seleccionar residuos</p>	<p>Fabricación de sistema experimental de línea de producción de cáscara de coco.</p>	<p>\$ 23 337, 74 + IVA</p>

La empresa Instituto Ecoco, ubicada en Fortaleza, Brasil ofrece maquinaria FORTALMAG para la obtención de polvo (sustrato) y fibra de coco verde. El Cuadro 4.7 detalla la información obtenida de los comercializadores.

Cuadro 0.7. Información de maquinaria FORTALMAG para la producción de polvo y fibra de coco verde.

Maquinaria	Detalle	Inversión
<p data-bbox="237 411 675 478">Maquinaria para el procesamiento de la cáscara de coco verde</p>  <p data-bbox="240 722 708 802">Figura 0.25. Máquina para la trituración, prensado y clasificación de la cáscara de coco verde FORTALMAG [44].</p>	<p data-bbox="732 411 1117 592">Maquinaria FORTALMAG con capacidad de producción de 1 500 a 2 000 cocos/hr para la producción de sustrato y fibra de pipa incluye:</p> <p data-bbox="732 630 1000 659">Elevador de material</p> <p data-bbox="732 701 1049 730">Triturador de coco verde</p> <p data-bbox="732 777 1122 915">Prensa rotativa horizontal con producción de 16 000 a 20 000 cocos/d para la extracción del LCCV</p> <p data-bbox="732 957 1114 987">Clasificadora de fibra y polvo</p> <p data-bbox="732 1033 1097 1100">Prensa hidráulica con fuerza de compactación de 12 t</p> <p data-bbox="732 1142 1114 1281">Tamiz tipo túnel para la clasificación del polvo con abertura de malla de 3, 5 y 10 mm</p> <p data-bbox="732 1323 1097 1390">Máquina de coser sacos para transportar el material</p>	<p data-bbox="1146 411 1406 625">\$ 61 652, 27 (para el tipo de cambio de reales brasileños a dólares al 7/6/23) + Envío</p>

CONCLUSIONES

- El principal impacto ambiental detectado como producto de la generación de los residuos de pipa de la empresa es el cambio impuesto al paisaje.
- Los impactos ambientales de la gestión inadecuada de los residuos de pipa en Costa Rica se deben principalmente a la baja degradabilidad del fruto y su volumen. La primera hace que se contaminen espacios como vías públicas y cuerpos de agua. Además, como producto del espacio que requieren, los cocos pueden llegar a disminuir la vida útil de rellenos sanitarios o vertederos, en caso de ser dispuestos en los mismos.
- La ubicación geográfica de la empresa procesadora es determinante en el costo y tiempo de transporte de los residuos de coco verde.
- La mayor parte de la literatura existente con respecto al tema estudiado proviene de Brasil. Para Costa Rica, esta es la primera investigación de dominio público relacionada con la gestión de los residuos de coco en un estado inmaduro.
- El análisis detallado de parámetros como lavado, maduración y procesos aplicados para la obtención del polvo de coco verde, es esencial para alcanzar un buen rendimiento y calidad del producto.
- La mayor parte de la maquinaria disponible para la transformación de los residuos de coco está diseñada para cuando el fruto se encuentra maduro, por lo que, si no se desea importar el equipo, se debe diseñar con las especificaciones necesarias. Este diseño puede alterar el orden de producción de los productos.

RECOMENDACIONES

- Actualizar los datos del INEC referentes a las extensiones sembradas y cosechadas de coco en Costa Rica, debido a que el último Censo Agropecuario se realizó en el 2014 y la información más reciente, presentada por la FAO, es una estimación.
- Realizar un análisis de la composición de los residuos de coco verde considerando las variables reportadas en la literatura, puesto que este estudio se realizó con pipas procedentes de una única zona geográfica y una sola variedad frutal, además de que su periodo de cosecha fue desconocido.
- Analizar el efecto de la maduración en las características químicas del sustrato de coco verde formulado en Costa Rica, específicamente sus efectos en el pH y conductividad eléctrica.
- Elaborar una investigación donde se determinen otras características específicas del sustrato, como densidad, capacidad de aireación, retención de humedad, entre otros.
- Utilizar el sustrato de coco verde para estudiar el desarrollo de cultivos que lo utilizan como medio de crecimiento.
- Desarrollar un estudio de costo/beneficio de la producción de fibra y polvo de coco verde.
- Investigar sobre otras aplicaciones de los residuos de pipa de Costa Rica, basadas en su potencial de comercialización, maquinaria disponible y beneficios ambientales.

REFERENCIAS

- [1] Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos y Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, “OECD-FAO Agricultural Outlook 2022-2031”, OECD iLibrary, https://www.oecd-ilibrary.org/agriculture-and-food/oecd-fao-agricultural-outlook-2022-2031_f1b0b29c-en (Consultado 21 ago., 2022).
- [2] I. O. Adejumo y O. A. Adebisi, "Agricultural Solid Wastes: Causes, Effects, and Effective Management", Strategies of Sustainable Solid Waste Management. Londres, Reino Unido: IntechOpen, 2020 [En línea]. Disponible: <https://www.intechopen.com/chapters/73517> doi: 10.5772/intechopen.93601.
- [3] Nellemann et al., “The Environmental Food Crisis: The Environment’s Role in Averting Future Food Crises” GRID Arendal A UNEP Partner, <https://www.grida.no/publications/154> (Consultado 22 ago., 2023).
- [4] P.K. Sath, S. Duhan y J.S. Duhan, “Agro-industrial wastes and their utilization using solid state fermentation: a review”, Bioresour. Bioprocess., vol. 5, no. 1, pp. 1-15, ene., 2018. Consultado: 19 ago. 2022. doi: 10.1186/s40643-017-0187-z.
- [5] Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, “FAOSTAT”, FAO, <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL> (Consultado 27 ago., 2022).
- [6] M.F. Rosa , et al., “CARACTERIZAÇÃO DO PÓ DA CASCA DE COCO VERDE USADO COMO SUBSTRATO AGRÍCOLA”, Emb. Trop. Agro., no. 56, pp.1-6, may., 2001. Consultado: 29 ago. 2022. [En línea]. Disponible: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CNPAT-2010/5862/1/Ct-054.pdf>.
- [7] Instituto Nacional de Estadística y Censos, “VI Censo Nacional Agropecuario Resultados Generales”, INEC, <https://www.inec.cr/censos/censo-agropecuario-2014>, (Consultado 27 ago., 2022).

[8] Promotora del Comercio Exterior de Costa Rica, “Oportunidades de comercialización para coco y subproductos”, PROCOMER, <http://sistemas.procomer.go.cr/DocsSEM/680FCF2C-F0EB-4968-A9CC-57616E7E3197.pdf> (Consultado 20 ago., 2022).

[9] CABI, “Cocos nucifera (coconut)”, Invasive Species Compendium, www.cabi.org/isc (Consultado 27 ago., 2022).

[10] I.M. Hutten, *The Handbook of Nonwoven Filter Media*, 2 ed. Florida, Estados Unidos: Butt. Hein., 2016. [En línea] doi: 10.1016/b978-0-08-098301-1.00004-6.

[11] Ministry of Fisheries, Crops and Livestock, New Guyana Marketing Corporation y National Agricultural Research Institute, “Postharvest handling technical series Coconut Postharvest Care and Market Preparation”, USAID, https://pdf.usaid.gov/pdf_docs/Pnacy843.pdf, (Consultado 26 ago., 2022).

[12] P. Morris, “Stock Photo - Coconuts - ripe & unripe”, Age Fotostock, <https://www.agefotostock.com/age/en/details-photo/coconuts-ripe-and-unripe/MEV-10854289> (Consultado 22 ago., 2023).

[13] M.F. Rosa, et al., “Proceso agroindustrial: Obtenção de pó de casca de coco verde,” *Embrapa Agroindústria Tropical*, https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CNPAT/7874/1/ct_61.pdf, (Consultado 28 ago., 2022).

[14] M.G. Lomelí-Ramírez, et al., “Comparative Study of the Characteristics of Green and Brown Coconut Fibers for the Development of Green Composites”, *Bio Re.*, vol. 13, no.1, pp.1637-1660, ene., 2018. Consultado: 28 ago. 2022. doi:10.15376/biores.13.1.1637-1660.

[15] A.N. Kampf y M.H. Fermino, “Substrato para plantas: a base da producao vegetal em recipiente”, presentado en Encontro Nacional sobre Substrato para Plantas, Porto Alegre, Brasil, 11 dic., 2000, 312p.

[16] W.M. Aragão, *Coco Pós-colheita*, 1 ed. Brasília, Brasil: Emb. Info. Tecno., 2002. [En línea]. Disponible: <http://livimagens.sct.embrapa.br/amostras/00070000.pdf>.

[17] A.C. Marafon, et al., *Aproveitamento de cascas de coco para geração de energia térmica: potencialidades e desafios*. Aracaju, Brasil: Embrapa, 2019. [En línea]. Disponible: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1119514/1/DOC234.pdf>.

[18] R. V. Silva, et al., “Fracture toughness of natural fibers/castor oil polyurethane composites” *Compo. Sci. and Tech.*, vol. 66, no. 10 , pp. 1328–1335, nov., 2005. Consultado: 9 set. 2022. doi:10.1016/j.compscitech.2005.10.012.

[19] F.C. Silva, *Manual de Análises Químicas de solos, plantas e fertilizantes*, 4 ed. Rio de Janeiro: Brasil: Emb. Info. Tecno., 2009. [En línea]. Disponible: <http://livimagens.sct.embrapa.br/amostras/00083136.pdf>.

[20] J.R. Sátiro, et al., “Estudo do Potencial da Casca do Coco Verde para Obtenção de Etanol Lignocelulósico”, presentado en Congr. Norte Nord. de Pesq. e Inova., Palmas, Brasil, 19-21 oct., 2012. [En línea]. Disponible: <https://propi.ifto.edu.br/ocs/index.php/connepi/vii/paper/viewFile/4639/1360>.

[21] R.S. de Liz y O.A. Carrijo, *Substratos para Produção de Mudás e Cultivo de Hortaliças*. Brasília, Brasil: Emb. Horta., 2008. [En línea]. Disponible: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/781301/substratos-para-producao-de-mudas-e-cultivo-de-hortalicas>.

[22] E. Corradini, et al., “Composição química, propriedades mecânicas e térmicas da fibra de frutos de cultivares de coco verde”, *Rev. Bras. Frutic.*, vol. 31, no. 3, pp. 837-846, set.

2009. Consultado: 7 set. 2022. doi: 10.1590/S0100-29452009000300030. [En línea].
Disponível:

<https://www.scielo.br/j/rbf/a/DQdC9ZVzgsndcvBjvGM4tNb/?format=pdf&lang=pt>.

[23] A.I.S. Brígida, et al., “Effect of chemical treatments on properties of green coconut fiber”, *Carbo. Polym.*, vol. 79, no. 2010, pp. 832-838, oct., 2009. Consultado: 7 set. 2022. doi:10.1016/j.carbpol.2009.10.005. [En línea]. Disponível: shorturl.at/ckpWZ.

[24] M.C.A.M Leite, et al., “Avaliação da biodegradação de compósitos de poli(ϵ -caprolactona)/fibra de coco verde”, *Polímeros*, vol. 20, n. especial, pp. 339-344, dec., 2010. Consultado: 7 set. 2022. doi: 10.1590/S0104-14282010005000063. [En línea]. Disponível: <https://www.scielo.br/j/po/a/Wztf7qWhDzyVmsXmdQsQKXn/?lang=pt>.

[25] O.A. Carrijo, Liz, R.S. y N. Makishima, “Fibra da casca do coco verde como substrato agrícola”, *Horticultura Brasileira*, vol. 20, no. 4, pp. 533-535, dec., 2002. Consultado: 13 ago. 2022. [En línea]. Disponível: <https://www.scielo.br/j/hb/a/PQsvvcv3dgWRHGTyD9qsFML/?format=pdf&lang=pt>.

[26] A.C. da Silva, “Reaproveitamento da casca de coco verde”, *Rev. do Centro do Ciên. Nat. e Ex.*, vol. 13, no. 5, pp. 4077-4086, nov., 2014. Consultado: 4 set. 2022. [En línea]. Disponível: <https://periodicos.ufsm.br/remoa/article/view/15186/pdf>.

[27] S. Banerjee, G. Aditya y G.K. Saha, “Household disposables as breeding habitats of dengue vectors: Linking wastes and public health”, *Waste Manag.*, vol. 33, no. 1, pp. 233-239, ene., 2013. Consultado 9 set. 2022. doi: 10.1016/j.wasman.2012.09.013.

[28] M.A. Gomes, et al., “Agricultural Coconut Cultivation Wastes as Feedstock for Lignocellulosic Ethanol Production by *Kluyveromyces marxianus*”, *Waste and Biom. Valor.*, vol. 12, no. 9, pp. 4943–4951, ene., 2021. Consultado: 11 ago. 2022. doi:10.1007/s12649-021-01345-w.

[29] P. K. Sath, S. Duhan, y J. S. Duhan, “Agro-industrial wastes and their utilization using solid state fermentation: a review”, *Biores. and Bioproc.*, vol. 5, no. 1, 2018. Consultado 20 ago. 2022. doi:10.1186/s40643-017-0187-z.

[30] C. da C. Nogueira, C. E. de A. Padilha y E. S. dos Santos, “Boosting second-generation ethanol titers from green coconut fiber by using high-concentration polyethylene glycol”, *Ind. Crops and Prod.*, vol. 166, pp. 1-10, mar., 2021. Consultado: 11 ago. 2022. doi:10.1016/j.indcrop.2021.113494.

[31] P.K.S. de Brito Bezerra, et al., “Cellulolytic enzymes behavior in delignified green coconut residues and enzymatic hydrolysis with enzyme recovery”, *Ind. Crops and Prod.*, vol. 172, pp. 1-9, set., 2021. Consultado: 7 ago. 2022. doi:10.1016/j.indcrop.2021.114037.

[32] S.L.R. de Oliveira, “Aproveitamento da casca do coco verde (*Cocos nucifera* L.) para produção de celulases”, Tesis de maestría, Dept. de Tecno. de Alim., Univ. Fed. do Ceará, Fortaleza, Brasil, 2010. [En línea]. Disponible: https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/UFC-7_56314c4d328c191c0f13baecb46fdc56.

[33] M.S. Silveira, “Aproveitamento das cascas de coco verde para produção de briquette em Salvador -BA”, Tesis de maestría, Gerenc. e Tecn. Amb. no Proc. Produ., Univ. Fed. da Bahia, Salvador, Brasil, 2008.

[34] A.P. Clasen, J.C. Bonadio y F. Agostinho, “Briquettes production from green coconut shells: technical, financial, and environmental aspects”, *Eng. Sanit. Ambient.*, vol. 27, no. 3, pp. 585-596, may.-jun., 2022. Consultado: 11 ago. 2022. doi:10.1590/S1413-415220200364.

[35] B. Miola, et al., “Aproveitamento energético dos resíduos de cascas de coco verde para produção de briquetes”, *Eng. Sanit. Ambient.*, vol. 25, no. 4, pp. 627-634, jul.-ago., 2020. Consultado: 15 set. 2022. doi:10.1590/S1413-4152202020180029.

[36] MFRURAL, “Briquete de casca de coco verde”, MFRURAL O agronegócio passa por aqui, <https://www.mfrural.com.br/detalhe/273731/briquete-de-casca-de-coco-verde> (Consultado 19 may., 2023).

[37] D. DasSharma, et al., “A mechanistic insight into enrofloxacin sorptive affinity of chemically activated carbon engineered from green coconut shell”, *J. of Envi. Chem. Eng.*, vol. 8, jun., 2020. Consultado: 10 set. 2022. doi:10.1016/j.jece.2020.104140.

[38] D. Das, D.P. Samal y M. BC., “Preparation of Activated Carbon from Green Coconut Shell and its Characterization”, *Jour. of Chem. Eng. and Pro. Tech.*, vol. 6, no. 248, 2015. Consultado: 18 may. 2023. doi:10.4172/2157-7048.1000248.

[39] F.P. Karagöz, A. Dursun y M. Karaşal, “A review: use of soilless culture techniques in ornamental plants”, *Ornam. Hort.*, vol. 28, no. 2, pp. 172-180, feb., 2022. Consultado: 10 set. 2022. doi: 10.1590/2447-536X.v28i2.2430.

[40] J.A. Cruz-Coronado y J.E. Monge-Pérez, “Producción de siete genotipos de pepino (*Cucumis sativus* L.) cultivados en ambiente protegido”, *Tec. en March.*, vol. 33, no. 2, pp. 102-118, abr.-jun., 2020. Consultado: 10 set. 2022. doi: 10.18845/tm.v33i2.4343. [En línea]. Disponible: https://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec_marcha/article/view/4343.

[41] I. Taskirawati, et al., “The Composition Of Coconut Fibers And Tofu Pulp As A Growing Media Of Oyster Mushrooms (*Pleurotus ostreatus*)”, *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 2021. doi:10.1088/1755-1315/830/1/012060. [En línea]. Disponible: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/830/1/012060/pdf>.

[42] L.A. Nunes, et al., “Waste green coconut shells: Diagnosis of the disposal and applications for use in other products”, *Jour. of Clean. Prod.*, vol. 255, may., 2020. Consultado: 11 ago. 2022. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120169.

[43] P. Noguera, et al., “Coconut coir waste, a new and viable ecologically-friendly peat substitute”, *Acta Hortic.*, pp. 279-286, 2000. Consultado: 29 ago. 2022. doi: 10.17660/ActaHortic.2000.517.34.

[44] A.L.A. Mattos, et al., “Beneficiamento da casca de coco verde”, Embrapa, <https://www.embrapa.br/en/agroindustria-tropical> (Consultado: 5 set. 2022).

[45] O.A. Carrijo, et al., *Uso da Fibra da Casca de Coco Verde para o Preparo de Substrato Agrícola*. Brasília, Brasil: Embrapa, 2003. [En línea]. Disponible: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/214389/1/digitalizar0371.pdf>.

[46] R.S. de Liz, “Análises físicas e químicas de substrato a base de coco verde para produção de mudas de hortaliças ”, Tesis de maestría, Fac. de Agro. e Med. Vet., Uni. de Brasília. , Brasília, Brasil, 2006.

[47] M. S. Mat Jusoh, M. N. Nordin y W. M. A. Wan Ahamad, “Comparison study on fiber and cocopeat from young coconut husks and old coconut husks”, *Adv Agri Food Res J*, vol.2, no.2, jul., 2021. Consultado: 16 mar. 2023. doi: 10.36877/aafmj.a0000216. Disponible: <https://journals.hh-publisher.com/index.php/AAFRJ/article/view/408/298>.

[48]. W.M. Aragão, V. do A.J. Santos y F. B. Aragão, “Produção de Fibra de Cultivares de Coqueiro”, Embrapa, <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/34696/1/cot-36.pdf> (Consultado: 16 mar. 2023).

[49] C.L. Pereira, et al., “Use of highly reactive rice husk ash in the production of cement matrix reinforced with green coconut fiber”, *Ind. Crop and Prod.*, vol. 49, no. 2013, pp. 88-96, abr., 2013. Consultado: 16 ago. 2022. doi: 10.1016/j.indcrop.2013.04.038.

[50] C.R. da Costa, et al., “Mechanical characterization of the green coconut fiber for application in the footwear industry”, *Intl. J. of Arts and Comm.*, vol. 2, no. 9, pp. 99-106,

oct., 2013. Consultado: 16 ago. 2022. [En línea]. Disponible: https://ijac.org.uk/images/frontImages/gallery/Vol._2_No._9/9.pdf.

[51] J.X. Lim, et al., “Development of Particleboard from Green Coconut Waste”, J. of Phys.: Conf. Ser., vol. 2120, 2021. Consultado: 19 may. 2023. doi: 10.1088/1742-6596/2120/1/012034.

[52] R.C. Leitão, et al., “Tratamento biológico do líquido da casca do coco-verde”, Embrapa, <https://www.embrapa.br/en/busca-de-publicacoes/-/publicacao/884014/tratamento-biologico-do-liquido-da-casca-do-coco-verde> (Consultado 29 mar. 2023).

[53] A.S. Pereira y M.U.C. Nunes, “Líquido da casca de coco verde: caracterização química e possíveis alternativas de uso na agricultura”, Embrapa, <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/186015/1/Liquido.pdf> (Consultado 17 mar. 2023).

[54] A. Avenza Álvarez, Preparación del medio de cultivo, 2 ed. Málaga, España: IC Editorial, 2018. [En línea]. Disponible: https://www.google.co.cr/books/edition/Preparaci%C3%B3n_del_medio_de_cultivo_AGA002/b1EpEAAAQBAJ?hl=es&gbpv=1&dq=conductividad+el%C3%A9ctrica+sustrato&pg=PT46&printsec=frontcover.

[55] A.L.A. Mattos, et al., "Processamento da casca de coco verde para a produção de pó e fibra”, J. Interamer. Soc. Trop. Hort, vol. 53, pp. 85-88, ene., 2011. Consultado: 15 mar. 2023.

[56] A.P. Torres, et al., “Producción Comercial de Cultivos Bajo Invernadero y Vivero, Medición de pH y Conductividad Eléctrica en Sustratos”, Purdue Extension, <https://mdc.itap.purdue.edu/item.asp?itemID=19590>, (Consultado 15 mar., 2023).

[57] D. Bitencourt y A. Pedrotti, “Usos da Casca de Coco: Estudo das Viabilidades de Implantação de Usina de Beneficiamento de Fibra de Coco em Sergipe”, Rev. da Fap., vol. 4, no. 2, pp. 113-122, jul.-dic. 2008.

[58] GERMANTEC, “Triturador de cocos TRC 40”, GERMANTEC, <https://www.germantec-cr.com/triturador-de-cocos-trc-50-2935229/p> (Consultado 10 abr., 2023).

[59] J. Costa López, et al., Curso de ingeniería química: Introducción a los procesos, las operaciones unitarias y los fenómenos de transporte, 1 ed. Barcelona, España: Edit. Rev., 1994. [En línea]. Disponible: https://www.google.co.cr/books/edition/Curso_de_ingenier%C3%ADa_qu%C3%ADmica/XZNYpvnO_V8C?hl=es&gbpv=1.

[60] Henan Kunteng Machinery Manufacturing Co., Ltd., “Máquina de separación de fibra de cáscara de coco, eficiente, de fibra de cáscara de Palma”, Alibaba, <https://spanish.alibaba.com/p-detail/High-1600851825577.html?spm=a2700.7724857.0.0.194236976S7qFu> (Consultado 26 may., 2023).

[61] R. Duran, “Estudio de prefactibilidad para la producción y comercialización de sustratos a base de fibra de coco en Costa Rica”, Tesis de maestría, Ger. Agro., Tec. de Costa Rica, San José, Costa Rica, 2021. [En línea]. Disponible: <https://www.kerwa.ucr.ac.cr/handle/10669/84445>.

[62] Instituto Meteorológico Nacional, “Regiones y Subregiones Climáticas de Costa Rica”, IMN, <https://www.imn.ac.cr/documents/10179/20909/Regionalizaci%C3%B3n+clim%C3%A1tica+de+Costa+Rica> (Consultado 5 jun., 2023).

[63] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales y Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), “Lineamientos técnicos: sistema de captación de agua de lluvia a nivel

vivienda”, Gobierno de México, https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/791594/LINEAMIENTOS_TECNICOS_SISTEMA_DE_CAPTACION_DE_AGUA_DE_LLUVIA.pdf (Consultado 17 jun., 2023).

[64] Ministerio de Servicios y Obras Públicas de Bolivia, “Guía técnica de diseño de proyectos de agua potable para poblaciones menores a 10000 habitantes”, SIHITA, <https://sihita.org/documento/otro/guia-tecnica-de-diseno-de-proyectos-de-agua-potable-para-poblaciones-menores-a-10000-habitantes/> (Consultado 17 jun., 2023).

[65] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura (FAO), “Captación y almacenamiento de agua de lluvia. Opciones técnicas para la agricultura familiar en América Latina y el Caribe”, FAO, <https://www.fao.org/3/i3247s/i3247s.pdf> (Consultado 17 jun., 2023).

[66] COOPEAGRI, “Fertilizante Abopac Urea Granular 45000g”, COOPEAGRI, <https://www.coopeagrienlinea.cr/> (Consultado 30 may., 2023).

[67] SEKO, “SAMURAI 5 Vuestro especialista para la alimentación zootécnica”, SEKO, <https://sekoindustries.com/files/2018/12/Catalog-Seko-mixing-wagons-samurai5-en-spa.pdf> (Consultado 7 jun., 2023).

[68] BENDIG, “Secadoras, secadora cilíndrica horizontal”, BENDIG, <https://www.bendig.co.cr/secadora.php> (Consultado 27 may., 2023).

APÉNDICES

**APÉNDICE 1: SECCIÓN LONGITUDINAL A TRAVÉS DE UN COCO VERDE,
COMÚNMENTE DENOMINADO PIPA EN COSTA RICA**



APÉNDICE 2: DISPOSICIÓN DE PIPAS EN UNA TARIMA

