

Universidad de Costa Rica
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería de Biosistemas

*Modelación del procesamiento agroindustrial del café desde la
fruta hasta el café oro*

**Informe de Proyecto Final de Graduación presentado a la
Facultad de Ingeniería como requisito para optar por el grado
académico de Licenciado en Ingeniería Agrícola y de
Biosistemas.**

José María Gómez Mora

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

Marzo 2019

Sometido a la Escuela de Ingeniería de Biosistemas de la Facultad de Ingeniería de la
Universidad de Costa Rica como requisito para optar por el grado académico de:
LICENCIATURA EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y DE BIOSISTEMAS

José María Gómez Mora
Postulante

Ing. Guillermo Asdrúbal Vargas Elías, D. Sc.
Director Proyecto Final de Graduación

Ing. José Alberto Miranda Chavarría, MBA
Miembro Comité Asesor

Ing. Beatriz Mazón Villegas, Ph. D.
Lectora

Ing. Kattia Solís Ramírez, D. Sc.
Presidente Tribunal Examinador

Dedicatoria

A mi familia.

Agradecimiento

A Dios.

A todas las personas que me ayudaron.

A Beneficios Volcafe Costa Rica por la oportunidad para desarrollar este trabajo.

Índice general

Dedicatoria.....	iii
Agradecimiento.....	iv
Índice general.....	v
Resumen.....	vii
1. INTRODUCCIÓN.....	9
2.1 Objetivo General.....	11
2.2 Objetivos Específicos.....	11
3. MARCO TEÓRICO.....	12
3.1 Generalidades del fruto del café.....	12
3.2 Comercialización y variedades.....	13
3.3 Procesos y mercados.....	14
3.4 Propiedades físicas.....	16
3.5 El café en Costa Rica: Ley 2762.....	17
3.5.1 Beneficio Volcafé San Diego.....	18
3.6 Análisis del proceso de beneficiado.....	19
3.6.1 El despulpado en húmedo del fruto de café.....	20
3.6.2 Eliminación del mucílago o mesocarpio.....	20
3.6.3 Secado del café en pergamino.....	21
3.6.4 Modelado matemático del secado en capa delgada.....	22
3.6.5 Almacenamiento del café en pergamino.....	23
3.6.6 Remoción del pergamino.....	24
3.6.7 Balance de masa del beneficiado de café.....	24
3.7 Modelación y simulación de procesos.....	25
4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	26
4.1 Beneficios Volcafé Costa Rica.....	26
4.2 Diagnóstico de la planta procesadora.....	28

4.3 Balance de masa del fruto de café	28
4.4 Determinación de propiedades físicas	28
4.5 Simulación del proceso de beneficiado del café.....	31
4.5.1 Simulación del proceso.....	31
4.5.2 Funciones de Arena	32
4.5.3 Secado.....	37
4.5.3.1 Parámetros de análisis estadístico.....	39
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	42
5.1 Diagnóstico del beneficio.	42
5.2 Descripción del proceso de producción de café.....	52
5.3 Secado del café en pergamino	56
5.4 Modelo de balance de masa en café.....	61
5.5 Propiedades físicas del café.....	64
5.5.1 Productos en cada etapa del proceso.....	65
5.6 Modelado del secado en capa delgada del café en guardiola	70
5.7 Simulación del proceso de beneficiado del café.....	79
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	85
6.1 Conclusiones.....	85
6.2 Recomendaciones	86
7. ANEXOS	87
8. GLOSARIO	89
9. BIBLIOGRAFÍA	92

Resumen

Este trabajo responde a la necesidad de desarrollar una herramienta que apoye el proceso de toma de decisiones del Beneficio San Diego de Volcafé Costa Rica con el fin de mejorar su capacidad de procesamiento previo a la ejecución de cambios en la parte operativa. La herramienta de simulación en una línea de proceso de beneficiado permite el análisis de posibles escenarios con el fin de poder administrar los riesgos operativos.

La capacidad instalada del Beneficio Volcafé San Diego permite clasificarlo como un megabeneficio, por lo que se diagnosticó la situación actual de la planta con el fin de caracterizar las principales operaciones unitarias y los equipos utilizados durante el proceso.

Los datos de la cosecha 2017-2018 de la empresa permitieron la elaboración de un balance de masa con un aprovechamiento del 18,5% a un contenido de humedad de 12% base húmeda (b.h.) y se determinó que, mediante los procesos de despulpado, desmucilaginado y despergaminado se remueve el 61,5% de la masa del café fruta inicial. Se remueve un 20% de esa masa, que corresponde al agua evaporada durante el secamiento. Finalmente solo un 18,5% de la masa inicial se logra transformar en producto terminado o café oro al 12% contenido de humedad en base húmeda. Estos resultados concuerdan con los de otras investigaciones realizadas a nivel de microprocesamiento.

La operación de secado por lotes en el equipo horizontal rotativo (también conocido como guardiola) se representó adecuadamente con el ajuste del modelo matemático de capa delgada de la ecuación de Midilli modificada y un coeficiente de determinación de 97,09%.

La simulación del proceso de beneficiado es una herramienta que permite la evaluación del flujo de producto y la capacidad del sistema, que puede ser usada como fuente de información para la toma de decisiones y la programación de actividades durante la cosecha. Esta se realizó sobre la línea de proceso de café mediante el análisis computacional con el programa Arena®, iniciando desde el fruto hasta obtener el café pergamino seco. Se determinó que el secado es la etapa de mayor utilización de los recursos en el beneficiado de café, con 98,6% de uso de las secadoras.

Finalmente los modelos desarrollados en este trabajo, de balance de masa y simulación de las operaciones, conllevan una simplificación de variables para su análisis, los cuales deben adaptarse a las condiciones propias de cada beneficio para su aplicación eficaz.

1. INTRODUCCIÓN

El café se introdujo a Costa Rica hace más de 200 años [1], y a su tratamiento poscosecha se le conoce como beneficiado. Este tratamiento puede realizarse tanto por vía húmeda como por vía seca, ya sea que se utilice o no, agua para su procesamiento. Esto tiene como consecuencia un espacio y utilización de recursos diferentes, influyendo significativamente en las características sensoriales del café oro, incidiendo directamente en el precio de venta. La literatura reporta que aproximadamente el 60% de los atributos de la calidad del café están gobernados por el procesamiento poscosecha [2].

De acuerdo con la Real Academia Española, se define el término beneficiar como el procesamiento de productos agrícolas, tanto en Costa Rica, como en otros países en Latinoamérica. El proceso de beneficiado tiene como propósito obtener el grano oro (también se le conoce como café verde debido a su color al final del procesamiento) a partir del fruto o cereza. Este último se lleva bajo condiciones controladas al tueste deseado y se muele según el tamaño de partícula requerido para la preparación de la bebida.

Este estudio permitió conocer a profundidad el procesamiento industrial de este producto agrícola por la vía húmeda, en el Beneficio San Diego, propiedad de Beneficios Volcafé Costa Rica, durante la cosecha 2017-2018. El beneficiado consiste en la remoción de las diferentes capas de la fruta o cereza hasta llegar al endospermo (café oro), llevándolo a un contenido de humedad en base húmeda de un 11,0% a un 12,0%, considerado un rango seguro para su almacenamiento; además de ser el rango comercialmente aceptado.

El café es uno de los principales productos agrícolas que exporta Costa Rica [3], y la Ley 2762 (Ley Sobre Régimen de Relaciones entre Productores, Beneficiadores y Exportadores de Café [4], vigente desde el 10 de julio de 1961), en su artículo 2 declara de interés público lo relativo a producción, elaboración, mercadeo, calidad y prestigio del café de Costa Rica, para todos sus efectos. Ciertamente Costa Rica es un país productor de café que lejos de competir por cantidad, como lo puede hacer Brasil o Vietnam, compite en los mercados internacionales por calidad, por lo que se debe estudiar exhaustivamente su procesamiento.

El principal aporte de este trabajo a la empresa es la herramienta innovadora que representa la simulación del proceso y el balance de masa, al ser una fuente de información técnica para la toma de decisiones operativas y administrativas. Esto le permite al Beneficio San Diego analizar posibles escenarios, minimizando el riesgo y reduciendo significativamente los costos asociados a cualquier modificación a la línea de procesamiento.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Elaborar un modelo de los flujos másicos que simule el tiempo de proceso en la transformación del café desde su recibo en cereza hasta la obtención de café oro.

2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar los equipos disponibles para cada operación unitaria.
- Determinar el consumo energético de cada proceso.
- Cuantificar las entradas y salidas de cada una de las operaciones unitarias dentro de la transformación a la que se somete el café, mediante el balance de la masa.
- Describir las propiedades físicas del café en términos de masa, volumen, densidad y contenido de humedad en cada etapa de su procesamiento.
- Simular la operación de secado en guardiola como secado de capa delgada.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 Generalidades del fruto del café

El fruto del café (Figura 1) consta de seis partes principales:

- Exocarpio o cáscara externa
- Mesocarpio, constituido por el mucílago, es una sola capa o cobertura que, al despulsarse el fruto, una parte se queda adherida al exocarpio y otra al endocarpio o pergamino, que es lo que debe eliminarse para obtener los cafés lavados.
- Endocarpio o pergamino
- Espermodermo o película plateada
- Endospermo o semilla de café, la cual normalmente tiene una cara convexa y otra plana con una fisura en el medio, como se muestra en la Figura 2.
- Embrión o germen.

Por cada fruto sano de café, se encuentran, generalmente, en su interior dos semillas con la cara plana una frente a la otra [5].

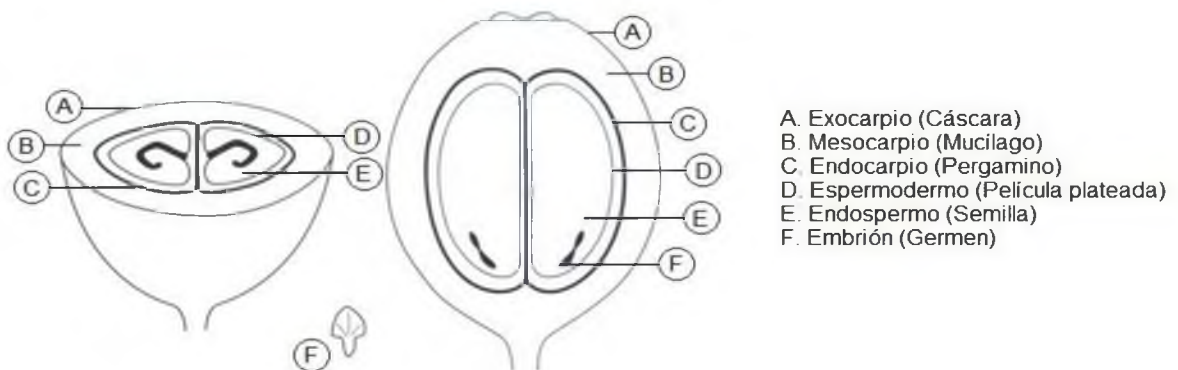


Figura 1. Partes principales del fruto [6].



Figura 2. Sección transversal de un grano de café en fruta [7].

3.2 Comercialización y variedades

En el mercado de café, se comercializan dos especies principales del género *Coffea*: *Coffea arabica* y *C. canephora*. [8]. Existen muchas variedades de café de la especie *arabica* como por ejemplo Caturra, Catuai, Geisha, Obata, Catiguá MG2, mientras que por su parte la especie *canephora* solamente cuenta con una variedad de trascendencia económica como es la Robusta [9]. En Costa Rica, desde 1988 por la vía de decreto ejecutivo, se prohibió la siembra y procesamiento de la especie *C. canephora* variedad Robusta por ser considerada de inferior calidad. En el año 2018, mediante Decreto Ejecutivo N° 41110-MAG del 22 de febrero del 2018, se autorizó la siembra, cultivo, beneficiado y comercialización de café robusta (*Coffea canephora*) en Costa Rica, enmarcado todo dentro de una política cafetalera, liderada por el Instituto de Café de Costa Rica, decreto que entró en vigencia desde el 16 de mayo de ese mismo año. Según datos de la Organización Internacional del Café (OIC) la producción mundial de café, por lo menos en el último lustro, ha mantenido aproximadamente la relación 60% *arábica* y 40% *robusta* [10].

3.3 Procesos y mercados

El beneficiado de café mediante la vía húmeda produce los cafés lavados mediante cada una de las etapas que se presentan en la Figura 3 [11].

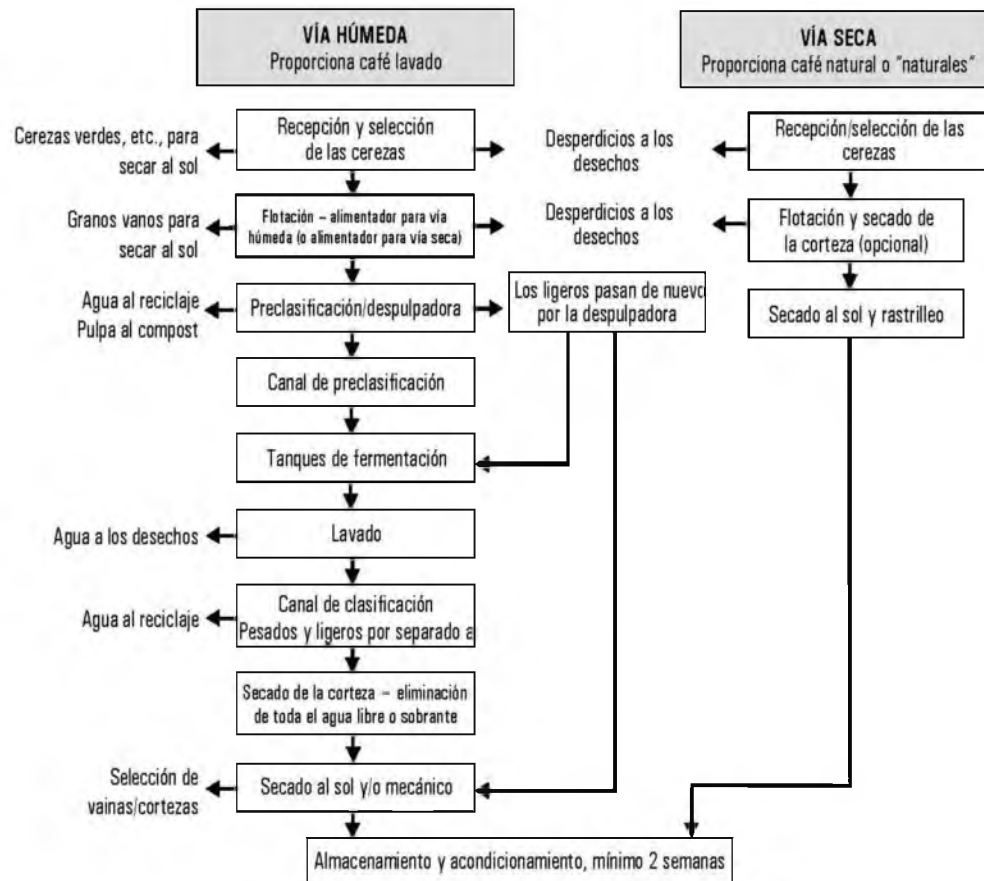


Figura 3. Diagrama del procesamiento agroindustrial del café por la vía húmeda y seca [11].

La Organización Internacional del Café (OIC) distingue cuatro principales tipos de café en el mercado internacional, en función a su origen, especie y proceso para clasificar los precios que se reconocen para cada grupo de países productores, según el cuadro 1 [12]. Sin embargo,

países con producción dual pueden estar en más de un grupo de acuerdo con el método utilizado para producir su café como se aprecia en el cuadro 2 [12]:

Cuadro 1. *Clasificación de los grupos de café según la OIC [12].*

Suaves Colombianos	Colombia, Kenia y Tanzania.
Otros suaves	Bolivia, Burundi, Costa Rica, Cuba, Ecuador, El Salvador, Guatemala, Haití, Honduras, India, Jamaica, Malawi, México, Nepal, Nicaragua, Panamá, Papúa Nueva Guinea, Perú, República Dominicana, Ruanda, Venezuela, Zambia y Zimbabue.
Naturales Brasileños	Brasil, Etiopía, Paraguay, Timor Oriental y Yemen.
Robustas	Angola, Benín, Camerún, Costa de Marfil, Filipinas, Gabón, Ghana, Guinea, Guinea Ecuatorial, Guyana, Indonesia, Laos, Liberia, Madagascar, Nigeria, República Centroafricana, República del Congo, República Democrática del Congo, Sierra Leona, Sri Lanka, Tailandia, Togo, Trinidad y Tobago, Uganda y Vietnam.

Cuadro 2. Clasificación de algunos orígenes de producción dual [12].

Grupo	Países
Otros suaves	Camerún, Indonesia, Madagascar, República Democrática del Congo y Uganda.
Naturales Brasileños	Filipinas, Tailandia y Vietnam.
Robustas	Brasil, Burundi, Ecuador, Guatemala, India, México, Papúa Nueva Guinea, República Dominicana, Tanzania y Timor Oriental.

3.4 Propiedades físicas

El contenido de humedad del fruto y del café en pergamino húmedo es 65 y 55% b.h., respectivamente. El café lavado, ya despulpado y desmucilaginado, debe someterse al proceso de secado, dentro de las 24 horas posteriores a su recolección, para disminuir su contenido de humedad de 55 a 12% b.h. Las referencias brasileñas indican que el procesamiento agroindustrial permite obtener 1 kg de café oro a partir de un volumen de fruto entre 7,5 y 8,5 L [13], con una densidad aparente del café fruta aproximada de 606,6 kg/m³ [14]. En Centroamérica, se estima que 253 kg de café fruta producen 47,1 kg de café oro al 12% contenido de humedad en base húmeda [15]. La densidad aparente reportada para el fruto y el café despulpado es de 616 y 846 kg/m³ respectivamente [6]

3.5 El café en Costa Rica: Ley 2762

El Reglamento a la Ley Sobre Régimen de Relaciones entre Productores, Beneficiadores y Exportadores de Café [16], define una planta de beneficio de café como el conjunto de instalaciones, maquinaria y obras de infraestructura necesarias para el acopio y proceso del fruto, desde su condición de café maduro hasta la de café oro, listo para su comercialización. Además, indica que forman parte de la planta las siguientes áreas:

- a) Área de recibo y medición,
- b) Maquinaria para despulpado y clasificación,
- c) Sistema de desmucilaginado,
- d) Sistema de lavado y clasificación,
- e) Sistema de tratamiento de aguas residuales,
- f) Maquinaria y/o instalaciones para el secado,
- g) Facilidades de almacenamiento y;
- h) Maquinaria de alistado para despacho de café.

La medida oficial para medir café en Costa Rica es el doble hectolitro el cual equivale a 200 litros de café fruta [4]. La fanega es una medida tradicional que equivale a dos dobles hectolitros, o sea 400 litros. En el medio cafetalero nacional, es normalmente aceptado que, en promedio, de una fanega de café en fruta se obtenga aproximadamente 1 quintal de café oro (46 kg), lo que varía según la zona cafetalera y el año de cosecha.

3.5.1 Beneficio Volcafe San Diego

De acuerdo con el Informe Sobre la Actividad Cafetalera de Costa Rica, 2017 en el Anexo 2-2, el rendimiento de beneficiado promedio a nivel nacional de la cosecha 2017 - 2018 fue de 45,40 kg de café oro por fanega de café fruta procesada [17] y según el precio de liquidación final del ICAFE de la cosecha 2017-2018 publicado el 16 de noviembre del 2018, el rendimiento obtenido por el Beneficio San Diego fue de 47,10 kg de café oro por fanega mientras que el rendimiento mínimo, obtenido por el ICAFE para el Beneficio San Diego fue de 47,35 kg por fanega [18]. La Ley 2762 exige que se utilice el rendimiento oficial del ICAFE para el pago de la liquidación final al productor, en caso de que el obtenido por el beneficio resulte menor.

Este beneficio recibe fruta de una de las regiones cafetaleras de mayor trascendencia por su calidad dentro y fuera del territorio nacional, la cual es reconocida internacionalmente como la Zona de Los Santos. El ICAFE define la Zona de Los Santos como una región que abarca los cantones de Desamparados, Aserri, Acosta, León Cortés Castro, Tarrazú, Dota, Cartago y El Guarco.

Actualmente de acuerdo con una muestra del 80% de los productores registrados en la base de datos del Beneficio San Diego en toda la Zona de Los Santos, predominan las variedades Caturra y Catuai con un 42% y un 34% respectivamente, así como un 14% de variedades Catimor, en especial el Costa Rica 95. El 10% restante está compuesto de las variedades Obatá, Venecia, Villa Sarchí, Geisha, Marsellesa.

3.6 Análisis del proceso de beneficiado

El Instituto del Café de Costa Rica (ICAFFE) ha manejado diversas variables para la categorización de los beneficios con el objetivo de identificar las características que mejor expliquen el comportamiento de cada elemento constitutivo de la estructura de costos de beneficiado. Por ejemplo, la cantidad de fanegas procesadas es una variable de clasificación que se utilizó para caracterizar beneficios relativamente homogéneos respecto al volumen de café fruta procesado durante la cosecha 2015-2016 [19]. El ICAFFE clasifica a las firmas beneficiadoras por la cantidad de fanegas procesadas, en seis estratos resumidos en el cuadro 3.

Cuadro 3. Estratificación de beneficios por cantidad de fanegas procesadas según ICAFFE, cosecha 2015-2016 [19].

Estrato	Rango (fanegas)
1	< 1.000
2	1.001 a 3.000
3	3.001 a 6.000
4	6.001 a 20.000
5	20.001 a 60.000
6	60.001 <

3.6.1 El despulpado en húmedo del fruto de café

El primer paso del proceso es medir el volumen del producto y la separación de calidad es por densidad, donde flota en agua la fruta de menor densidad, con contenido de humedad del fruto del 65% [20]. De acuerdo con la Ley 2762, el despulpado debe realizarse en las 24 horas posteriores al momento de la cosecha y se requiere de una muestra para la determinación de la calidad física. El procesamiento da inicio con un cambio significativo en la masa, a través del descascarado mecánico por el despulpador de cilindro rotatorio a 120 rpm con capacidad de 4.500 kg/h a 5.000 kg/h de café cereza [21].

La cáscara presenta un contenido de humedad entre 80% y 85% [22], su ámbito de densidad aparente está entre 270 kg/m³ y 300 kg/m³ y su masa representa entre el 40% y 44% del fruto [23].

3.6.2 Eliminación del mucílago o mesocarpio

Para la elaboración de cafés lavados, es necesaria la remoción total del mucílago del grano. Este proceso es posible realizarlo a través de dos métodos: mecánicamente o por la vía de la fermentación natural. Anteriormente se utilizaban máquinas que requerían grandes cantidades de agua para remover el mucílago, sin embargo, las desmucilagadoras mecánicas recientemente diseñadas, minimizan considerablemente el consumo de agua y el tiempo de proceso requerido. La operación consiste en facilitar la fricción tanto entre los granos como contra un cilindro metálico con capacidad de trabajo de 2 000 L/h a 3 600 L/h [21].

3.6.3 Secado del café en pergamino.

El secado del café es un proceso fundamental para preservar la calidad del café y la calidad de taza, que es el parámetro de referencia para asignar el precio final del producto. Este proceso hace uso de los siguientes recursos: una cámara de combustión (que en este caso es el horno de fuego indirecto), un ventilador que hace pasar el aire a través de los tubos del intercambiador de calor que contienen los gases de combustión, y una estructura cilíndrica rotativa horizontal donde se dispone la carga de café a secar de forma uniforme [24] tal y como se muestra en la Figura 4.

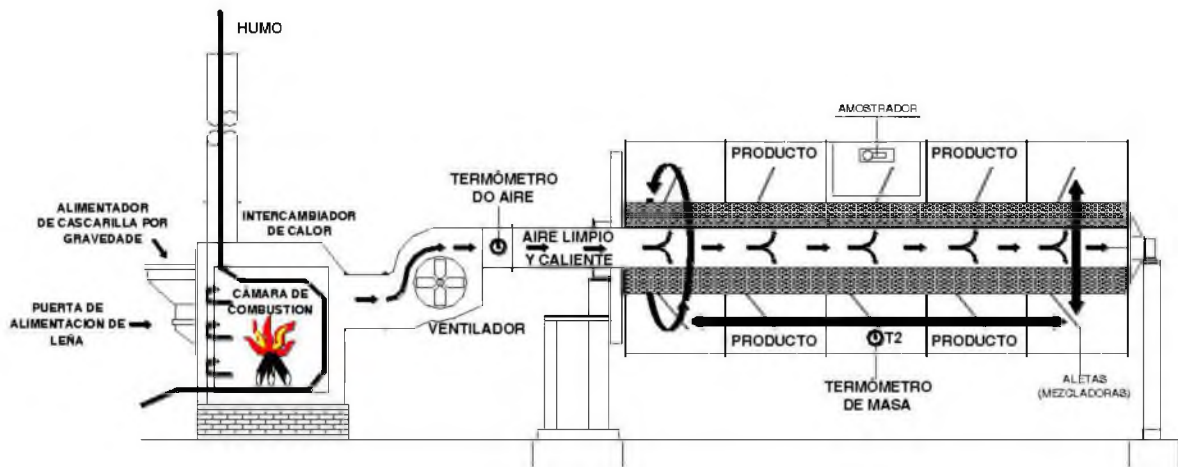


Figura 4. Sistema de secamiento en secadora rotativa horizontal [25].

El secado con aire caliente remueve cantidades de humedad de un sólido a través de evaporación por convección, donde hay tanto transferencia de calor como de masa en forma simultánea. Durante el secado, el aire caliente suministrado seca la masa de grano inicialmente en una etapa que es relativamente eficiente y rápida, a partir de la cual se va haciendo cada vez más lenta y el secado se vuelve más difícil [26].

Posterior a la remoción del mucílago parcial o total se debe secar el café hasta llevarlo a un contenido de humedad que oscile entre 10 – 12% en base húmeda, debido a que el café en pergamino, desprovisto de la pulpa y del mucílago, tiene su humedad entre 50 – 55% b.h. [27] y por esta razón se debe remover el agua rápidamente para evitar el deterioro de la calidad.

3.6.4 Modelado matemático del secado en capa delgada

El secado de capa fina se refiere al proceso en el que todos los granos están expuestos por completo al aire de secado bajo condiciones de secado constante, mientras que en el secado de capa gruesa los granos no están por completo expuestos a las mismas condiciones de secado del aire, es decir cambia con el tiempo y con la profundidad de la capa de grano [26]. Por otra parte, el secado en capa fina tiene un comportamiento típico de una curva exponencial decreciente en el tiempo, haciendo que la mayoría de los modelos matemáticos utilicen funciones exponenciales, o modificaciones, para representar el sistema físico. En este trabajo, se utilizaron los modelos de Page, Lewis, Midilli Modificado, como se muestra en el Cuadro 4, para aproximar el valor de la razón de humedad en el tiempo, de acuerdo con la ecuación 3.1:

$$MR_t = \frac{M_t - M_e}{M_i - M_e} \quad (3.1)$$

donde:

MR_t es la razón de humedad en base seca

M_t es el contenido de humedad b.s. en el tiempo t

M_e es el contenido de humedad b.s. de equilibrio

M_i es el contenido de humedad b.s. al inicio del proceso de secado

Cuadro 4. Modelos matemáticos de secado utilizados en capa fina*.

Nombre	Ecuación
Page	$MR_t = \exp(-kt^n)$
Lewis	$MR_t = \exp(-kt)$
Midilli Modificado	$MR_t = \exp(-kt) + bt$

* b y n son parámetros estimados para cada modelo, k la constante de velocidad de secado y t es el tiempo de secado en horas.

La constante de velocidad de secado, k , utilizada en los modelos matemáticos de secado, tiene unidades de h^{-1} , y está directamente relacionada con la tasa a la que el agua es removida del grano. Investigaciones realizadas encontraron que k es característica para cada tipo de grano, que existe una relación proporcional entre k y la temperatura de secado y que influyen también factores como el contenido de humedad inicial e instantáneo del grano y el caudal del aire de secado y su humedad relativa. [28]

3.6.5 Almacenamiento del café en pergamino

Para preservar la calidad del café oro, se recomienda el almacenamiento en pergamino seco del café arábica lavado [29]. El café en pergamino seco a un contenido de humedad entre el 10% y el 12% en base húmeda se encuentra en condiciones adecuadas para el almacenamiento seguro, generalmente en silos, donde deberá permanecer hasta que le sea removido el pergamino para ser despachado en cumplimiento de un contrato.

Al ser Costa Rica un país con clima tropical donde predomina la humedad relativa mayor a 75% y de acuerdo con su relación de equilibrio higroscópico, el contenido de humedad de café oro debe ser menor a 12% b.h. asociado a una humedad relativa intergranular menor a 60% [30]. De esta forma se reduce el crecimiento de hongos y se previene la ocurrencia de reacciones bioquímicas en presencia de alta humedad [31].

3.6.6 Remoción del pergamino

Para poder tostar el café y prepararlo para su uso final, se debe eliminar el pergamino o endocarpio que recubre el grano. Se determinó que el pergamino oscila entre 15– 20% del peso del café pergamino seco, lo cual coincide con otras investigaciones que indicaron valores de 18 – 20% [21], sin embargo, en cafés de calidad especial se observaron valores de 16% [32]. Este proceso es conocido como trillado, descascarillado o despergaminado.

3.6.7 Balance de masa del beneficiado de café

Según Miranda [33], se determinó que de 100 kg de café fruta se obtuvieron 58,4 kg de café despulpado y 41,6 kg de pulpa, posterior al despulpado. Después del desmucilaginado se obtuvieron 42,8 kg de café en pergamino húmedo y 15,6 kg de mucílago. Al secar el café hasta un contenido de humedad del 12% en base húmeda, se determinó que el agua ligada y no ligada correspondió a una masa de 19,9 kg, lo que significa que la masa de café en pergamino seco es de 22,9 kg. En el último paso del beneficiado, el despergaminado, la investigación obtuvo como resultado una masa de pergamino de 4,3 kg y una masa final de grano oro de 18,6 kg como muestra la Figura 5 [33].



Figura 5. Balance de masa de 100 kg de café fruta [33].

3.7 Modelación y simulación de procesos

Modelar y analizar mediante la simulación es considerado como el proceso de construir y experimentar un modelo matemático computarizado de un fenómeno o sistema físico, es decir, de un conjunto de componentes que interactúan entre sí recibiendo entradas y que se transforman en salidas para cumplir algún objetivo [34]. La simulación tiene como propósito obtener entendimiento de la operación de un sistema, desarrollar políticas (reglas) de operaciones o recursos para mejorar el desempeño del sistema, evaluar conceptos y sistemas nuevos antes de su implementación para ganar información sin disturbar el sistema actual. A pesar de las ventajas de la simulación es crucial tener en cuenta que la simulación no da resultados precisos cuando los datos de entrada son imprecisos, no provee respuestas simples a problemas complejos y la simulación por sí sola no resuelve los problemas [34].

Un sistema puede ser modelado a través tres componentes básicos: entidades (algo que cambia el estado del sistema, por ejemplo, una persona que provee un servicio o un componente a la espera de ser procesado), esperas (término de simulación para las líneas, por ejemplo, un primero en entrar primero en salir, PEPS, o FIFO por sus siglas en inglés) y recursos (quienes procesan o sirven a las entidades que están en una línea de espera). La

simulación como tal requiere de una lista de eventos que le da seguimiento a las diferentes cosas que ocurren durante la corrida de simulación. Cualquier situación que ocurra durante la corrida se define como un evento, por ejemplo, las llegadas de las entidades, los tiempos de inicio o finalización para las entidades.

Finalmente, las métricas de desempeño del sistema simulado más usuales son el tiempo en que una entidad toma para abandonar el sistema, el tiempo de espera dentro del sistema, el número promedio de entidades esperadas a estar en cola y el porcentaje de utilización de los recursos [34].

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Beneficios Volcafe Costa Rica.

ED&F MAN es una corporación inglesa establecida en 1783, que comercializa productos agrícolas tales como café, azúcar, melaza, granos, entre otros, con operaciones en 60 países. Desde el año 2004, Volcafe es la unidad de negocio de ED&F MAN encargada del abastecimiento global de café oro. Volcafe Ltd. es la oficina central y está ubicada en Suiza. Desde ahí se controlan las operaciones de las oficinas de Volcafe en los países productores como Brasil, Vietnam, Colombia, Costa Rica y muchos otros. Volcafe Costa Rica cuenta con cuatro beneficios húmedos, estos son Santo Domingo, San Diego, El General, Sarchí y el beneficio seco Dosmil. Los beneficios húmedos reciben café en fruta y entregan como producto final el café oro al beneficio seco, para su venta local o exportación. Este trabajo se realizó en el Beneficio Volcafe San Diego, en San Rafael Arriba de Desamparados, en la provincia de San José, para la cosecha 2017-2018. En la Figura 6 se muestra una imagen

satelital de las instalaciones del beneficio, tomada de Google Maps© con las coordenadas 9°52'16"N, 84°04'43"W en el sistema de referencia WGS84.



Figura 6. Fotografía satelital Beneficio San Diego.

4.2 Diagnóstico de la planta procesadora.

Se hizo una descripción de cada una de las etapas del proceso de beneficiado desde el recibo hasta el almacenamiento temporal de café. Preliminarmente se realizó un recorrido por la planta para identificar y cuantificar las potencias nominales de cada uno de los equipos, así como un inventario de estos. Adicionalmente, la empresa suministró los datos de tiempos de procesamiento, capacidades y flujos en salida de cada una de las etapas del proceso.

4.3 Balance de masa del fruto de café

El análisis de rendimiento por peso es uno de los ejemplos de balances de masa aplicados a nivel de laboratorio con aplicación directa a la agroindustria y sirve de apoyo legal en la comercialización entre productores y torrefactores. Fue desarrollado un balance de masa del proceso agroindustrial a partir de los rendimientos reportados internamente por la empresa al final de la cosecha.

4.4 Determinación de propiedades físicas

Se utilizaron productos y subproductos del café (*Coffea arabica*) provenientes del mismo lote de producción del Beneficio Volcafe San Diego. Se tomó una muestra de 10 litros en cada una de las etapas de procesamiento industrial del mismo día de recolección del café fruta y la misma zona de producción. A pesar de que se trató del mismo lote de producción, no es posible precisar la variedad del café utilizado para el estudio, debido a la diversidad de productores que entregan su café a la empresa. Todas las operaciones unitarias en el proceso de transformación se realizaron completamente a mano para el análisis a nivel de laboratorio.

Las características físicas fueron calculadas a partir del promedio y con su respectiva desviación estándar entre las repeticiones según el análisis con estadística descriptiva.

El café fruta se colocó en un recipiente con agua para eliminar impurezas y granos que flotaron. Una vez lavado, se procedió a remover manualmente la cáscara, tratando de minimizar la cantidad de mucílago adherida a esta. Para el desmucilaginado, se utilizó papel toalla y se eliminó el mucílago por fricción con las toallas de papel y se logró cuantificar por diferencia de masa la proporción de mucílago en el grano.

Las proporciones de masa fueron determinadas en balanza marca Boeco modelo BPS 52 plus con capacidad de $2\ 100 \pm 0,01$ g, con los materiales obtenidos después de cada proceso en el beneficio de café.

El contenido de humedad fue determinado por evaporación del agua en el horno de convección forzada marca Venticell modelo L515-B2V/VC111, conexión a 115V y 8,3A a $105\ ^\circ\text{C}$ por 24 h, en muestras triplicadas de 5 g siguiendo la metodología de las reglas para el análisis de semillas (RAS) del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Abastecimiento de Brasil [35].

La densidad aparente de los sólidos fue determinada en el densímetro con capacidad para contener una masa de producto en 1 litro. La densidad real fue determinada con el desplazamiento del líquido producido por el espacio que ocupan los sólidos al ingresar a un picnómetro que contenía aceite de soya comercial un volumen de $32,254 \pm 0,005$ mL a una temperatura de $25\ ^\circ\text{C}$. La densidad real se calculó con la ecuación 4.1 [36]:

$$\rho_p = \rho_a \times \left(\frac{M_p}{M_a} \right) \quad (4.1)$$

Donde:

ρ_p densidad real del producto; kg/m^3

ρ_a densidad real del aceite; kg/m^3

M_p masa del producto; kg

M_a masa del aceite desplazado, kg

Para el cálculo de la densidad aparente se utilizó la ecuación 4.2:

$$\rho_{aparente} = \frac{M_t}{V_t} \quad (4.2)$$

Donde:

$\rho_{aparente}$ es la densidad aparente del producto; kg/m^3

M_t la masa del producto contenido en 1 L; kg

V_t el volumen del densímetro, 1 litro

Es posible también obtener el valor de la porosidad intergranular, el cual es calculado a partir de la ecuación 4.3, tal y como se muestra a continuación:

$$\varepsilon = \left(1 - \left(\frac{\rho_{aparente}}{\rho_{real}} \right) \right) \times 100 \quad (4.3)$$

Donde:

ε porosidad; *adimensional*

$\rho_{aparente}$ densidad aparente; kg/m^3

ρ_{real} densidad real; kg/m^3

4.5 Simulación del proceso de beneficiado del café

4.5.1 Simulación del proceso

Debido a que el beneficio recibe café de una diversidad de productores, se tomaron los registros de recibo de la empresa y se estimó el tiempo entre cada llegada de producto a lo largo de la cosecha.

El recibo de café en la empresa es altamente variable en cantidad y tiempo, es decir, no se tiene un control sobre el volumen de café y la hora de llegada al beneficio por lo que es de esperarse que el tiempo entre llegadas no pueda ser descrito a través de ninguna de las distribuciones de probabilidad teóricas, que fue comprobado de forma preliminar ($p\text{-value} < 0,05$) para la distribución Normal, Triangular, Exponencial, Poisson, Binomial y Weibull en el software Minitab. A raíz de lo anterior, los datos sobre tiempos entre llegadas fueron resumidos utilizando una distribución de frecuencias aleatoria.

Una simulación de Montecarlo es una técnica ampliamente utilizada en la investigación de operaciones y análisis de riesgos que se basa en la generación de números aleatorios de los valores críticos del proceso [37], con base en su distribución probabilística registrada, con el

propósito de evaluar la sensibilidad del sistema (o el proceso) ante cambios en dichos valores. Una variable crítica en el modelo del proceso de beneficiado es el tiempo entre llegadas, el cual será simulado con esta técnica.

Las unidades de flujo o entidades, como se les llama en Arena ®, corresponden a 255 kilogramos de café fruta, lo que equivale a la masa de una fanega para el Beneficio San Diego. Estas fueron creadas en el sistema con tiempos aleatorios según esta distribución de probabilidad.

Los registros de operación (número de máquinas y tiempos de procesamiento) de cada etapa reportados por la empresa, fueron utilizados para establecer la capacidad de cada uno de los recursos (máquinas). De esta forma, el análisis fue regido por la sensibilidad de cada recurso ante variaciones propias de la aleatoriedad de la distribución de probabilidad (distribución de frecuencias) que describe los tiempos entre llegadas.

4.5.2 Funciones de Arena

Arena® es un software que trabaja con un lenguaje de simulación general especial para las aplicaciones industriales desarrollado por Rockwell Automation [38] y consiste en un grupo especial de herramientas que le permiten al usuario evaluar las alternativas de las mejores aproximaciones para optimizar y hacer más eficiente un proceso [39].

Para la elaboración de la simulación en Arena® se utilizaron los siguientes módulos:

Crear: El inicio de un flujo de proceso. Aquí se crean e ingresan las entidades a la simulación. Las entidades pueden ser productos, documentos o personas que están recibiendo un servicio o son sometidas a un proceso.



Figura 7. Módulo crear en Arena®.

Disponer: El final del flujo de proceso. Las entidades son removidas de la simulación en este módulo. Este se utiliza para las salidas de los subproductos del café.



Figura 8. Módulo disponer en Arena®.

Proceso: Una actividad, usualmente realizada por uno o más recursos y que requiere un tiempo dado para completarse. El tipo de acción utilizado aquí es el “Seize Delay Release” el cual indica que el recurso se reserve, sea utilizado durante un tiempo de procesamiento y después vuelva a estar disponible para la siguiente entidad.

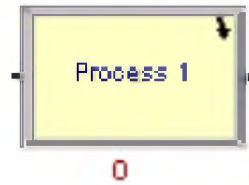


Figura 9. Módulo proceso en Arena®.

Decisión: Se toma una decisión y se sigue un camino en la simulación. Como una forma de establecer los rendimientos en cada etapa de procesamiento, se utilizó el módulo lógico “decide” que permite direccionar el flujo de entidades individuales de acuerdo con una regla de decisión de una posibilidad en dos vías.

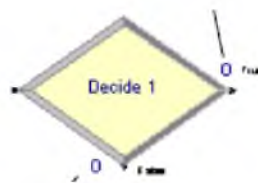


Figura 10. Módulo decisión en Arena®.

Lote: Es un mecanismo de agrupamiento dentro del modelo. Se agrupa una cierta cantidad de entidades antes de que sean procesadas. En la etapa de secado, se utilizó el módulo “batch” para formar los lotes de 2 760 kg que fueron ingresados como unidad de flujo de procesamiento a las guardiolas con base en su capacidad promedio.

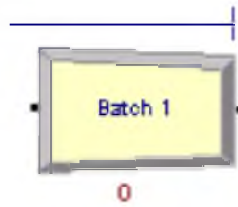


Figura 11. Módulo lote en Arena®.

Separación: Se separan las entidades que fueron agrupadas en un lote antes de ingresar a un proceso. Este módulo es necesario ya que para que pueda separar el agua del café pergamino húmedo, después del secado, el modelo necesita que las entidades no estén agrupadas.



Figura 12. Módulo separación en Arena®.

Las entidades se crean y experimentan una operación que involucra la utilización de un recurso (desmucilaginado, por ejemplo), la lógica de acción fue definida como un “seize delay release” es decir, la entidad conforme llega al recurso, reserva el recurso, lo utiliza durante un tiempo (tiempo de procesamiento constante) y lo libera, para dejarlo disponible para la siguiente entidad. Como una forma de establecer los rendimientos en cada etapa que la empresa tiene contabilizados, aprovechamiento, es decir la proporción del producto que

ingresa a una etapa y que sale para continuar con la siguiente, se utilizó el módulo lógico “decide” que permite direccionar el flujo de entidades de acuerdo con una regla de decisión de una posibilidad en dos vías; por ejemplo la empresa considera que en la etapa de despulpado un 59% de la masa de producto que ingresa, continúa la línea de procesamiento (café despulpado) y el restante abandona el proceso como desecho, a través del módulo de disponer, tal como se muestra para cada recurso (etapa) en el Cuadro 5.

Finalmente, en la etapa de secado, se utilizó el módulo “batch” para formar los lotes de 2 760 kg de café que fueron ingresados como unidad de flujo de procesamiento a las guardiolas con base en la capacidad promedio de éstas que es de 60 quintales (aproximadamente 8-9 m³). De esta forma se procedió a simular el proceso durante un tiempo de 5 días a jornada continua con 3 réplicas. En términos generales, el programa generó tiempos entre llegadas de producto de forma aleatoria con base en su distribución de frecuencias, con el objetivo de determinar la tasa de utilización de cada recurso conforme ingresa producto al proceso, es decir, un estudio de la sensibilidad del beneficiado ante la variación de las llegadas de producto como análisis de riesgo operacional del procesamiento de café, desde el recibo hasta su disposición para el almacenamiento temporal.

Cuadro 5. *Condiciones de la simulación del beneficiado de café en Arena.*

Etapa	Capacidad (número de máquinas)	Tiempo de procesamiento (h/unidad de flujo)	Aprovechamiento* (%)
Separación de Flotes	-	-	90%
Despulpado	10	0,0002379	
Separación de pulpa y café	-	-	59%
Desmucilaginado	4	0,0001218	
Separación de mucílago y café	-	-	72,9%
Lote para secado	-	-	
Secado	10	24	

* Es la proporción másica residual después de cada operación unitaria, que continúa en el proceso de transformación.

4.5.3 Secado

En el Cuadro 6 se muestran algunas características técnicas de la guardiola. Para el análisis del secado en capa delgada, se tomaron los datos de contenido de humedad en base húmeda reportados por Porter [24] en sus dos evaluaciones en la guardiola 4 del Beneficio San Diego, partiendo de la hipótesis de que no existe un frente de secado dentro del equipo, es decir que el secado por unidad de tiempo en cualquier punto de la secadora es uniforme. Estos datos se convirtieron en contenidos de humedad en base seca y se expresaron en términos de razón de humedad instantánea para cada sección de acuerdo con la ecuación 3.1. Para esto, se utilizó como valor de contenido de humedad de equilibrio, el contenido de humedad comercialmente establecido de 12,0% base húmeda, el cual es equivalente a 13,6% en base seca.

Cuadro 6. Características técnicas de la Guardiola 4 del Beneficio San Diego.

Característica	Descripción	Valor	Unidades
Dimensiones			
	Diámetro	1,80	m
	Largo	4,80	m
	Volumen	12,21	m ³
Capacidades			
	Capacidad pergamino húmedo	9,52	m ³
	Capacidad oro equivalente	60,00	quintales
	Contenido de humedad promedio entrada	35,00%	b.h.
	Contenido de humedad promedio salida	12,0%	b.h.
	Caudal de aire de secado a 60 °C	12 000,00	m ³ /h

A los datos de razón de humedad de la primera evaluación, se ajustó el modelo matemático de capa delgada de Midilli Modificado, de Page y de Lewis, con el software SigmaPlot 12.0 y se obtuvo la curva de regresión con su respectiva constante de secado y los parámetros estimados para evaluar si el secado de café en guardiola se comporta como un secado en capa delgada del grano. Estos modelos han sido utilizados para la descripción del secado en capa fina de productos agrícolas con aplicaciones al secado de frutos de café [40] y café en pergamino [41].

Por último, el modelo con coeficiente de determinación más cercano a la unidad, se valida con los datos de razón de humedad de la segunda evaluación de la guardiola 4 y se calculan los errores asociados de acuerdo con la siguiente sección.

4.5.3.1 Parámetros de análisis estadístico

Coeficiente de determinación:

Cuando se construyen modelos matemáticos basados en datos experimentales o medidos, las pruebas de bondad de ajuste son de gran importancia para determinar qué tan exacto es el modelo desarrollado, o en otras palabras, qué tan confiable es el modelo para replicar o incluso hacer pronósticos, a partir de los datos observados o de nuevas mediciones.

En este sentido, el coeficiente de determinación, también conocido como R Cuadrado, es el parámetro estadístico más utilizado en las pruebas de bondad de ajuste. El R Cuadrado toma valores entre 0 y 1 para definir la calidad del modelo. Entre más cercano a 1 sea este valor, mejor es la calidad del modelo.

Error Absoluto Medio (Mean Absolute Error, MAE): consiste en la diferencia entre dos valores. Se parte del hecho que estos dos valores, son condiciones que describen un mismo evento, y típicamente corresponden a un valor observado (o medido) y un valor predicho. Como se pretende que la calidad del modelo sea alta, la diferencia entre estos dos valores debería ser baja, haciendo que lo ideal que el MAE tienda a valores pequeños. A continuación se muestra la ecuación para su cálculo:

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y_i - \hat{y}_i| \quad (4.4)$$

Donde:

MAE es el error absoluto medio,

N el número de datos

y_i es el dato observado

\hat{y}_i es el dato predicho por el modelo

Error Cuadrático Medio (Mean Square Error, MSE)

Este error consiste en una extensión del MAE, pues al elevar las diferencias al cuadrado se resuelven dos situaciones. La primera, es que se eliminan signos negativos (al igual que con el valor absoluto), y la segunda es que al elevar al cuadrado, penaliza diferencias mayores a 1 entre los valores, pero por otra parte premia a las diferencias menores a la unidad. El error cuadrático medio se puede calcular a partir de la siguiente ecuación:

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (4.5)$$

Donde:

MSE es el error cuadrático medio,

N el número de datos

y_i es el dato observado

\hat{y}_i es el dato predicho por el modelo

Raíz del Error Cuadrático Medio (Root Mean Square Error, RMSE)

Este indicador corresponde a una variante del MSE. La diferencia es que aquí se calcula el valor de la raíz cuadrada. Se utiliza primordialmente para analizar la exactitud en las predicciones entre distintos modelos. En general también se busca que el valor del RMSE sea bajo, dado que un valor de 0 corresponde a una situación ideal y perfecta. Este error se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (4.6)$$

Donde:

RMSE es la raíz del error cuadrático medio,

N el número de datos

y_i es el dato observado

\hat{y}_i es el dato predicho por el modelo

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Diagnóstico del beneficio.

El Beneficio Volcafe San Diego, según datos del ICAFE, ha recibido en promedio las últimas dos cosechas un total de 185 679,5812 fanegas o unidades de cuatrocientos litros [42] lo que lo ubica en el estrato número seis de acuerdo con la clasificación de ICAFE, (Cuadro 3) [19]. En este caso, 185 000 fanegas supera en mucho el límite inferior del estrato, lo cual daría pie a clasificar al beneficio como "megabeneficio", que es el término utilizado en el medio cafetalero nacional para beneficios que superan las 100 000 fanegas.

Del análisis operativo del beneficio es posible afirmar que esta instalación agroindustrial cuenta con 1,4 MW de potencia eléctrica nominal instalada aproximadamente. Si se comparan todas las operaciones, la mayor participación la tiene el secado y el presecado con un 27% y 26% del total respectivamente, seguido por el alistado con 10% de participación, el recibo con 8%, desmucilaginado con 7% y el despulpado con 6%. El 16% restante se distribuye principalmente entre los transportadores helicoidales para la fermentación natural, para el almacenamiento y el tratamiento de desechos como mucílago y broza y las bombas centrífugas y tamices para el tratamiento de aguas.

Las operaciones unitarias de secado y presecado, que cuentan con 58 y 40 motores eléctricos respectivamente suman el 42% del total de equipos inventariados y representan en conjunto más del 50% del total de energía instalada en la planta. Esto sin tomar en cuenta el consumo energético de luminarias y equipos de oficina que forman parte del consumo energético total del beneficio. Casi una tercera parte del total de potencia instalada corresponde al

movimiento de productos y subproductos, por medio de elevadores de cangilones y transportadores helicoidales. El sistema de transporte es un elemento de soporte esencial del proceso y aunque no es una operación que transforma el producto o afecta el balance de masa, no es despreciable en términos de costos y energía.

La energía calórica de la leña y la cascarilla que se utilizan como combustible en los hornos de convección para los procesos de presecado y secado, sumada a la energía eléctrica requerida para llevarlos a cabo, los colocan como los procesos de transformación del café fruta que más energía requiere. El Cuadro 7 es el resumen del inventario de equipos realizado y en él se muestran los motores eléctricos y potencia eléctrica nominal instalada de cada una de las operaciones del beneficio.

Cuadro 7. *Potencia nominal reportada por cada una de las operaciones.*

Operación	Equipos	Cantidad de motores	Potencia Nominal (kW)	Total
Recibo		22		107,4
	Bomba centrífuga	6	8,70	52,20
	Transportador Helicoidal	5	3,73	18,64
	Elevador Cangilones	3	3,73	11,19
	Winche Angarilla	3	3,73	11,19
	Escurreidor Vertical Primeras	2	3,73	7,46
	Criba de flotes	1	2,24	2,24
	Escurreidor Vertical Recirculación	1	2,24	2,24
	Escurreidor Vertical Segundas	1	2,24	2,24
Despulpado		25		79,8
	Despulpador	10	3,73	37,28
	Chancador horizontal rechazo	6	2,24	13,42
	Transportador Helicoidal	4	3,73	14,91
	Despulpador rechazo	3	2,24	6,71
	Criba	2	3,73	7,46
Desmucilaginado		6		96,9
	Desmucilaginadora	4	22,37	89,5
	Bomba centrífuga	2	3,73	7,5

Operación	Equipos	Cantidad de motores	Potencia Nominal (kW)	Total
Fermentación natural		13		70,8
	Transportador Helicoidal	9	3,73	33,56
	Bomba centrífuga	2	14,91	29,83
	Elevador Cangilones	2	3,73	7,46
Presecado		40		350,5
	Transportador Helicoidal	13	3,73	48,5
	Elevador Cangilones	7	3,73	26,1
	Secadora Columnar Vertical	5	14,91	74,6
	Ventilador Secadora Columnar Vertical	5	14,91	74,6
	Escurreidor Vertical	4	3,73	14,9
	Lavadora Escurreidora	2	22,37	44,7
	Oreadora de Cascada	2	18,64	37,3
	Ventilador Oreadora de Cascada	2	14,91	29,8
Secado		58		371,4
	Transportador Helicoidal	22	3,73	82,03
	Ventilador Guardiola	16	14,91	238,62
	Motorreductor Guardiola	16	2,24	35,79
	Elevador Cangilones	4	3,73	14,91
Alistado		27		140,2

Operación	Equipos	Cantidad de motores	Potencia Nominal (kW)	Total
	Transportador Helicoidal	13	3,73	48,47
	Elevador Cangilones	8	3,73	29,83
	Clasificadora Densidad	2	4,47	8,95
	Trilladora de Fricción	1	44,74	44,74
	Ventilador Trilladora de Fricción	1	3,73	3,73
	Clasificadora Tamaño	1	2,24	2,24
	Transportador Vibratorio	1	2,24	2,24
Almacenamiento		22		82,0
	Transportador Helicoidal	22	3,73	82,03
Tratamiento de aguas		9		27,6
	Bomba centrífuga	5	3,73	18,64
	Tamiz	4	2,24	8,95
Tratamiento de desechos		11		41,0
	Transportador Helicoidal	9	3,73	33,56
	Escurreidor Vertical	2	3,73	7,46

La electricidad es la principal fuente de energía en el beneficiado de café y se distinguen cuatro diferentes rubros en la facturación: energía, máxima demanda, otros cargos e impuesto sobre las ventas [19].

La Compañía Nacional de Fuerza y Luz (CNFL) facturó un total de 1,38 GWh al Beneficio San Diego por la energía eléctrica consumida en el periodo comprendido entre el 01 de octubre del 2017 al 30 de setiembre del 2018, con un costo promedio anual de 72,07 colones/kWh. El total corresponde a un monto cercano a los 100 millones de colones por concepto de energía, de los cuales un 81% fue consumido entre los meses de noviembre y diciembre del 2017 y enero y febrero del 2018, que concuerda a su vez con los meses de maduración del café en la Zona de Los Santos de acuerdo con los datos de recibo de fruta del beneficio según el cuadro 8:

Cuadro 8. Distribución mensual del recibo de café fruta en el Beneficio San Diego para la cosecha 2017-2018.

Mes	Cantidad de Fanegas Recibidas	Porcentaje
Octubre 2017	3 198	1,6%
Noviembre 2017	22 188	11,1%
Diciembre 2017	65 564	32,8%
Enero 2018	78 556	39,3%
Febrero 2018	27 585	13,8%
Marzo 2018	2 798	1,4%
TOTAL	199 889	100%

En cuanto al rubro de máxima demanda la CNFL facturó un total de 3,12 MW al beneficio durante el mismo periodo de estudio y el costo promedio anual fue de 11 280 colones/kW, por lo que el total pagado por concepto de demanda por el Beneficio San Diego fue de cerca de 35 millones de colones.

El coeficiente técnico que utiliza el ICAFE para la energía eléctrica, es una estimación de la cantidad promedio anual de kWh requeridos para elaborar un saco de 46 kg de café oro (kWh/46 kg) y se obtiene como el cociente de dividir el acumulado de kWh consumidos por el beneficio entre la cantidad de café oro procesado, durante el año cosecha.

Es posible obtener un coeficiente técnico a partir de la ecuación 5.1:

$$CT = -2,9639 + 1,5896 * \ln(f) \quad (5.1)$$

Donde CT es el coeficiente técnico y f es la cantidad de fanegas procesadas por el beneficio [19] y con coeficiente de correlación de 0,6420. El costo unitario anual promedio por unidad de servicio utilizado se denota en colones/kWh para el concepto de energía. Este costo es calculado como el cociente de dividir los cargos anuales facturados por este servicio, entre el consumo total de energía durante la cosecha 2015-2016. Es posible obtener un costo unitario a partir de la ecuación 5.2:

$$CU = 194,3657 - 13,5226 * \ln(f) \quad (5.2)$$

donde CU es el costo unitario y f es la cantidad de fanegas procesadas por el beneficio [19] y con coeficiente de correlación de -0,7439.

Para la facturación del servicio la más importante de las demandas, es la máxima demanda ocurrida en el período de un mes y promediada durante 15 minutos. La máxima demanda se cobra porque el proveedor debe disponer de la infraestructura necesaria para poder satisfacer la potencia en un momento determinado, a pesar de que esta infraestructura permanezca subutilizada el resto del tiempo [19]. A continuación, se muestra en la Figura 13 la distribución mensual del consumo de energía eléctrica y en la Figura 14 la máxima demanda de potencia eléctrica del Beneficio San Diego para la cosecha 2017 – 2018: Los valores de estos gráficos pueden ser consultados en el Anexo A, en la página 88

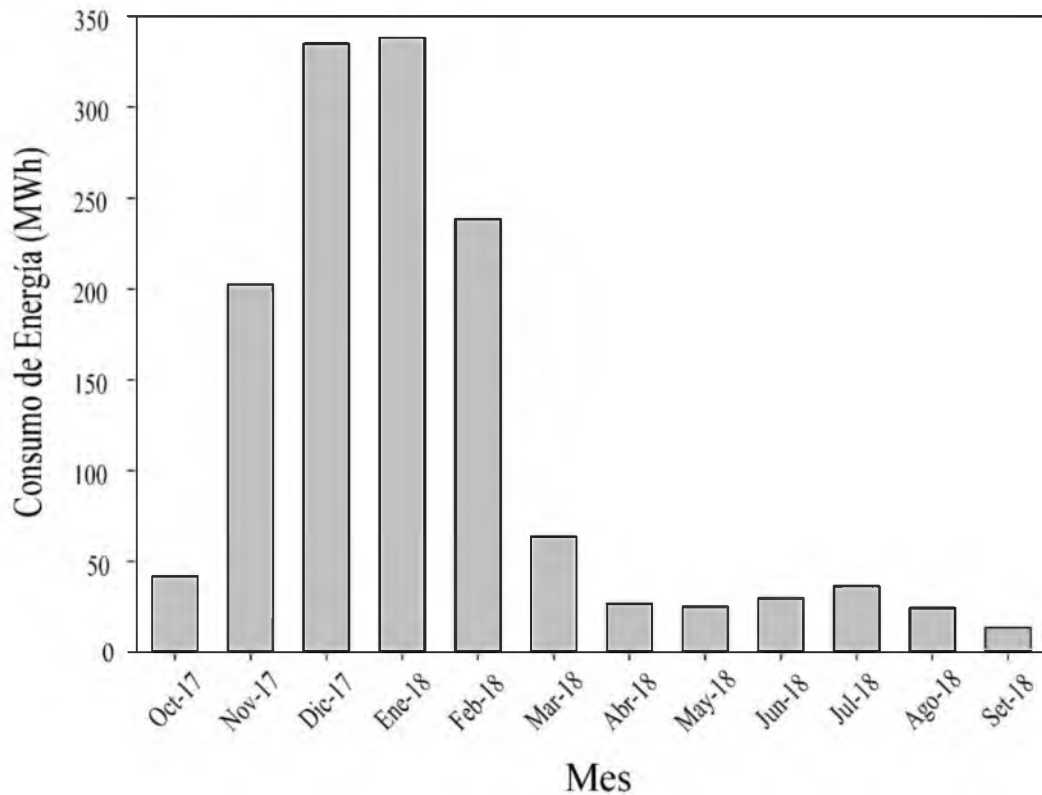


Figura 13. *Distribución mensual del consumo de energía eléctrica (kWh) en el Beneficio San Diego para la cosecha 2017-2018.*

Es posible apreciar en la Figura 14 que el consumo de energía tiene un pico anual que ciertamente coincide con los meses de cosecha para la zona cafetalera en estudio. En este caso noviembre, diciembre, enero y febrero son los meses en los que el consumo es muy alto debido a los volúmenes diarios de café recibido. Hasta el 81% del consumo anual de energía

es consumido en solamente estos cuatro meses. Para los restantes meses del año, el consumo ronda en promedio los 30 – 35 MWh mensuales.

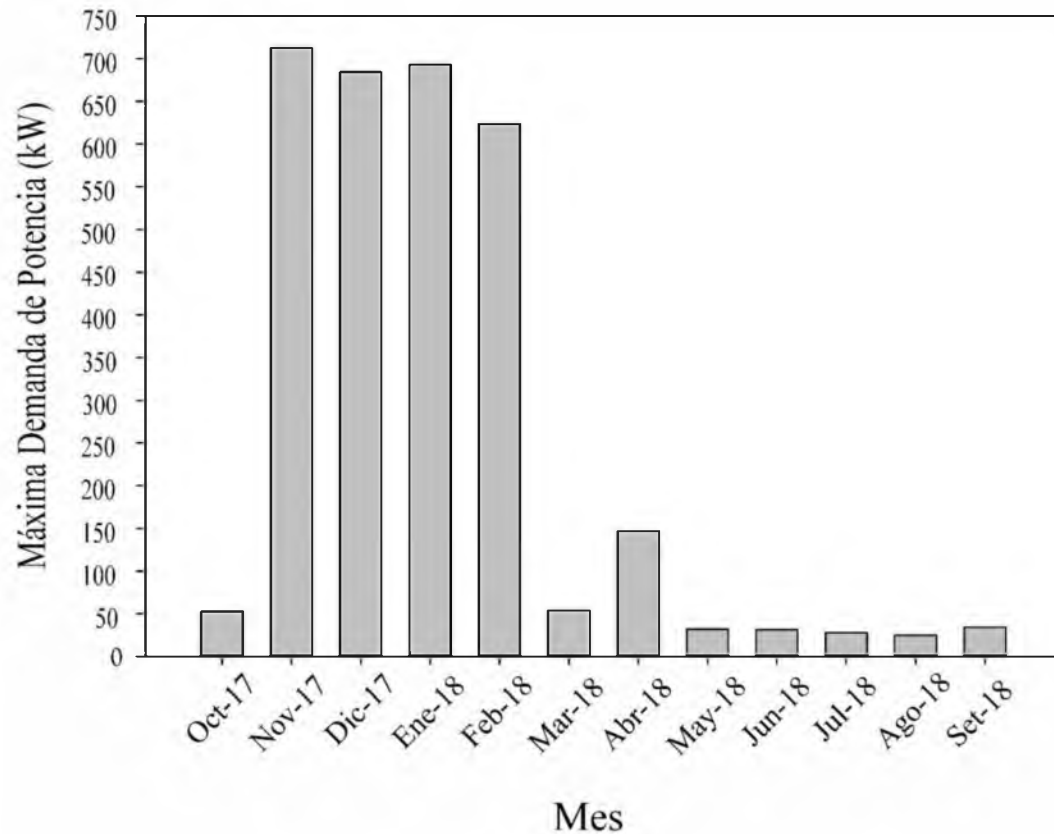


Figura 14. Distribución mensual de la máxima demanda de potencia (kW) en el Beneficio San Diego para la cosecha 2017-2018.

De forma similar que con el consumo de energía, el comportamiento de la máxima demanda de potencia aumenta significativamente en cosecha, llegando a ser hasta de un 87% de la demanda anual en estos cuatro meses. En noviembre, diciembre, enero y febrero, la demanda

llega a alcanzar valores de hasta 18 veces la demanda promedio mensual de los meses restantes. El pico en el mes de abril se puede deber a las necesidades del beneficio de trillar el café y enviarlo al beneficio seco después de almacenar el café durante dos meses aproximadamente.

5.2 Descripción del proceso de producción de café.

Dentro de las principales operaciones de beneficiado que se dan en beneficio San Diego se encuentran detalladas las siguientes:

Recibo de la fruta (medición volumétrica): El café al momento de la entrega es medido en un recipiente que normalmente se le llama *medida* o *angarilla* (1 x 0,5 x 0,4 m) que se muestra en la Figura 15.



Figura 15. Mecanismo autorizado para medir el café en Costa Rica, conocido como angarilla.

ICAFE verifica las dimensiones de las angarillas en cada cosecha, lo que permite medir el volumen de café en los recibidores y beneficios. La medida más pequeña de café que existe en el medio nacional se conoce como cuartillo, el cual es equivalente a la cuarta parte de una cajuela. La cajuela es la décima parte de una angarilla y es equivalente a 20 litros de café fruta. La angarilla tiene una capacidad de 200 litros, es decir, media fanega de café fruta. En el Beneficio San Diego, se lleva un registro de masas de cada medida y de esta forma es posible obtener una densidad aparente promedio del café fruta, aproximada a los 255 kg/fanega, siendo el promedio nacional 250 kg/fanega aproximadamente [21].

En el Beneficio San Diego (SDI), se tienen tres angarillas autorizadas para medir café, las cuales, una vez realizada la medida, descargan el café a celdas de carga calibradas que permiten cuantificar la masa de cada medida. Una vez que se obtiene el dato, el café es liberado hasta un elevador que lo lleva hasta el punto de acopio o sifón. Sifón es un nombre genérico que representa las pilas donde se deposita el café en espera de ser transportado hasta los despulpadores.

Separación por densidad: Durante el proceso húmedo, el café pasa por el *caño despedrador*, en el que se remueve todo el material pesado, como piedras y metales para que ingrese el café fruta al sifón espumador. En esta etapa se da un proceso de separación de material denso o pesado del material liviano, conocido como flotes, compuesto por frutos afectados por enfermedades o plagas principalmente, por lo tanto, su calidad ha sido afectada irreversiblemente. Estos granos de café separados y cuya densidad es menor, son en parte granos brocados, es decir con daño por la plaga *Hypothenemus hampei*, granos secos, vanos, *chasparria* y verdes o inmaduros. El café denso o aceptado llega a un sifón escurridor, en el que se separa del agua utilizada para el transporte y solamente el café fruta ingresa al módulo de despulpado.

Despulpado (chancado): Consiste en la remoción del exocarpio y parte del mesocarpio cuyo conjunto se le conoce en Costa Rica como broza del café. Los despulpadores pueden ser horizontales o verticales.

Los chancadores “de primera” despulpan el café pesado más grande, los chancadores “de segunda”, café pesado de tamaño medio y los chancadores “de tercera y repasos” procesan

café de granos más pequeños, flotes, verdes, etc., sin embargo, a pesar de tratarse de una separación y procesamiento por aparte del café estas no son consideradas calidades propiamente.

El operario debe calibrar y ajustar las máquinas despulpadoras de forma tal que no se produzca un daño mecánico sobre el producto y además de que no vayan granos de café mezclados en la broza. La apariencia física del café dañado por una máquina mal calibrada perjudica el precio de venta de ese café, pues esto es un impacto directo en la calidad del grano, además lo expone al ataque de microorganismos lo que puede tener un efecto en la calidad de la taza de café.

Proceso de fermentación: El mucílago es un tejido biológico, esto es un conjunto complejo y organizado de células que viene adherida al grano de café y se encuentra justo debajo del exocarpio (cáscara) y por encima del endocarpio (pergamino). La remoción de esta capa por fermentación natural implica un proceso bioquímico llevado a cabo por microorganismos como bacterias y levaduras, en el cual se transforma una sustancia orgánica compleja en otra más simple [43].

Remoción mecánica del mesocarpio: El mucílago también puede ser removido de forma mecánica, si este fuera el caso, se utilizan las desmucilagadoras conocidas como *delvas*, las cuales usan agua y fricción para removerlo. Si al café se le remueve totalmente el mucílago, es considerado entonces un *café lavado* [11].

Lavado y clasificación de pergaminos: Esta es una clasificación de calidad importante en función de las calidades finales a obtener en las preparaciones del café oro: Primer

pergamino, segundo pergamino, tercer pergamino, borras o inferiores. Si bien es cierto esta clasificación prácticamente ya no se hace en los beneficios, al menos se manejan dos calidades de pergamino; primeras e inferiores. Dicha separación por lo general se lleva a cabo en el caño metálico conocido como “*caño colombiano*”. Posterior a la clasificación el café es lavado profundamente para asegurarse de que no exista mucílago o broza residual en el café pergamino húmedo, previo al proceso de secado. A partir de este momento se denomina al producto *café en pergamino húmedo*.

5.3 Secado del café en pergamino

El secado se realiza en tres fases: oreado, presecado y secado; las dos primeras fases a velocidad constante y la tercera fase a velocidad decreciente, razón por la cual la temperatura y el caudal de aire son las dos variables más relevantes en el secado [44].

Oreado: El café lavado se traslada hasta una máquina llamada *oreadora de cascada* (Figura 16), la cual se encarga de eliminar la película de agua que cubre el pergamino después del lavado, con ayuda de una plataforma vibratoria y altos flujos de aire. Al someter el café pergamino húmedo al oreado, su contenido de humedad se reduce a velocidad constante del 55% b.h. al 50-48% b.h. aproximadamente.

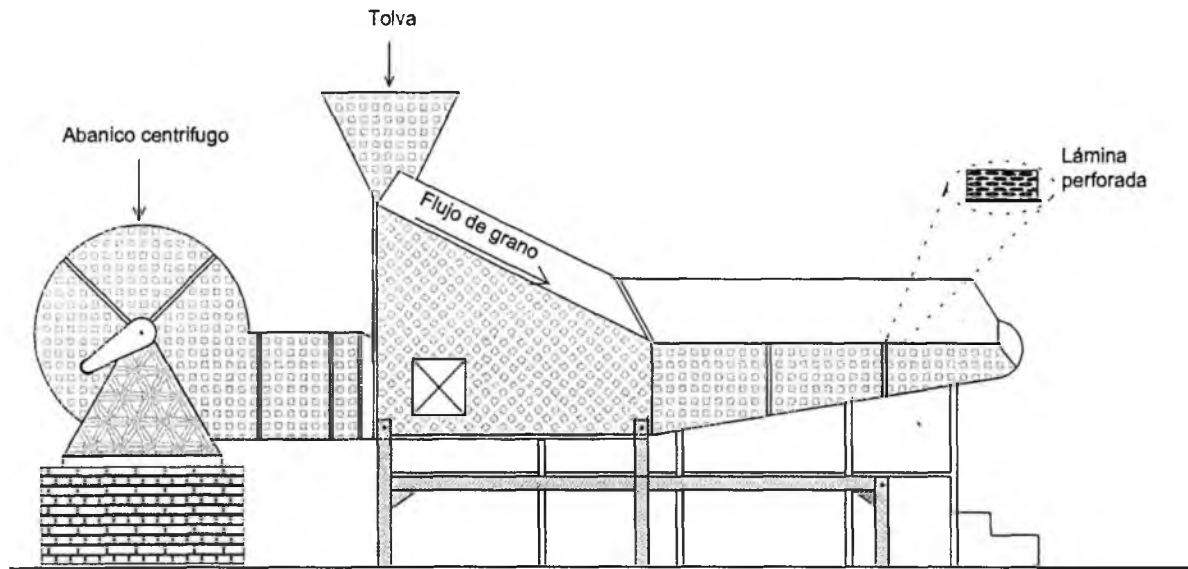


Figura 16. Secadora de alto flujo de aire conocida como oreadora de cascada [45]

Presecado: Posteriormente se eleva el café en pergamino hasta las secadoras verticales columnares las cuales mediante un intercambio de calor y masa disminuyen el contenido de humedad a velocidad constante desde 48 – 50% b.h. hasta un rango entre 30 – 35% b.h. en plazos que van desde las 12 – 24 horas.

Secado mecánico en secadoras rotativas horizontales (*guardiolas*): El café es trasladado desde las secadoras verticales columnares hasta las guardiolas para ser llevado a un contenido de humedad del $12 \pm 5\%$ b.h. A ese porcentaje, se da por finalizado el proceso de secado. En ese momento el ventilador se apaga, se descarga el café seco al piso y reposa aproximadamente 1 hora.

Control de Calidad: Se toma una muestra representativa del lote de secado y se envía al departamento de catación para evaluar su calidad, con el objetivo principal de descartar la presencia de sabores no deseados. Si el resultado de la catación es favorable, es decir que *las tazas están limpias*, se almacena el producto en silos. En caso de que se detecte un defecto grave de taza, el café deberá ser almacenado en sacos debidamente identificados y no podrá ser enviado al silo de la calidad correspondiente.

Almacenamiento: El café será almacenado en pergamino seco durante dos a tres meses, antes de ser pelado para ser enviado al beneficio seco en el cual recibirá un proceso de catado y escogido para mejorar su apariencia física y preparación de acuerdo con las calidades contratadas.

El Ing. Rafael Hernández, Gerente Comercial del Grupo Volcafé Costa Rica, Q grader del Coffee Quality Institute y además de ser un especialista con más de veinte años de experiencia en control de calidad de café, explica el efecto que tiene el reposo del café pergamino en el silo, sobre las características sensoriales:

“A medida que el café se va transformando desde la planta de café hasta el grano seco, se van desarrollando características que conforme se seca se asientan en el pergamino y la condición física y química del grano empieza a estabilizarse. De esta manera se dejan atrás el sabor herbal, fresco y astringente y se convierte en un grano mucho más estable. Dicha estabilidad le otorga al grano mayor sabor, un posgusto más delicado, además de una serie de compuestos aromáticos. Todo lo anterior se percibe en lo que se llama el cuerpo del grano. La acidez en términos de intensidad no sufre grandes variaciones. Por lo general,

estos cambios se van dando gradualmente a lo largo de dos a tres meses en el silo, el cual es considerado el tiempo óptimo de reposo para el desarrollo de estas características y su mayor expresión en la taza. Entre menor sea el reposo, mayor sabor vegetal en la taza y subdesarrollo de las características deseadas” [46].

De lo anterior es posible concluir que, para obtener la calidad de taza objetivo, es necesario que sea almacenado en pergamino seco en un ambiente seco, fresco e higiénico, con humedad relativa de 60% [30] por un tiempo antes del despergaminado.

Alistado: Con ayuda de una máquina despergaminadora se remueve el endocarpio o pergamino, dejando descubierto el grano oro. El pergamino o cascarilla es recolectada y almacenada en un silo, pues sirve como combustible para ser incorporada junto con la leña en los hornos indirectos, para calentar el aire de secado.

Despacho. El café es enviado desde el beneficio con una guía de café oro que indica la cantidad de sacos enviados, el peso por cada uno de los sacos y la calidad de cada una de las partidas hasta el Beneficio Dosmil, en Heredia, también propiedad de Volcafe Costa Rica.

La Figura 17 muestra el diagrama de flujo de todas las operaciones unitarias en el procesamiento agroindustrial de café y su transformación de café fruta hasta café oro en el Beneficio Volcafe San Diego.

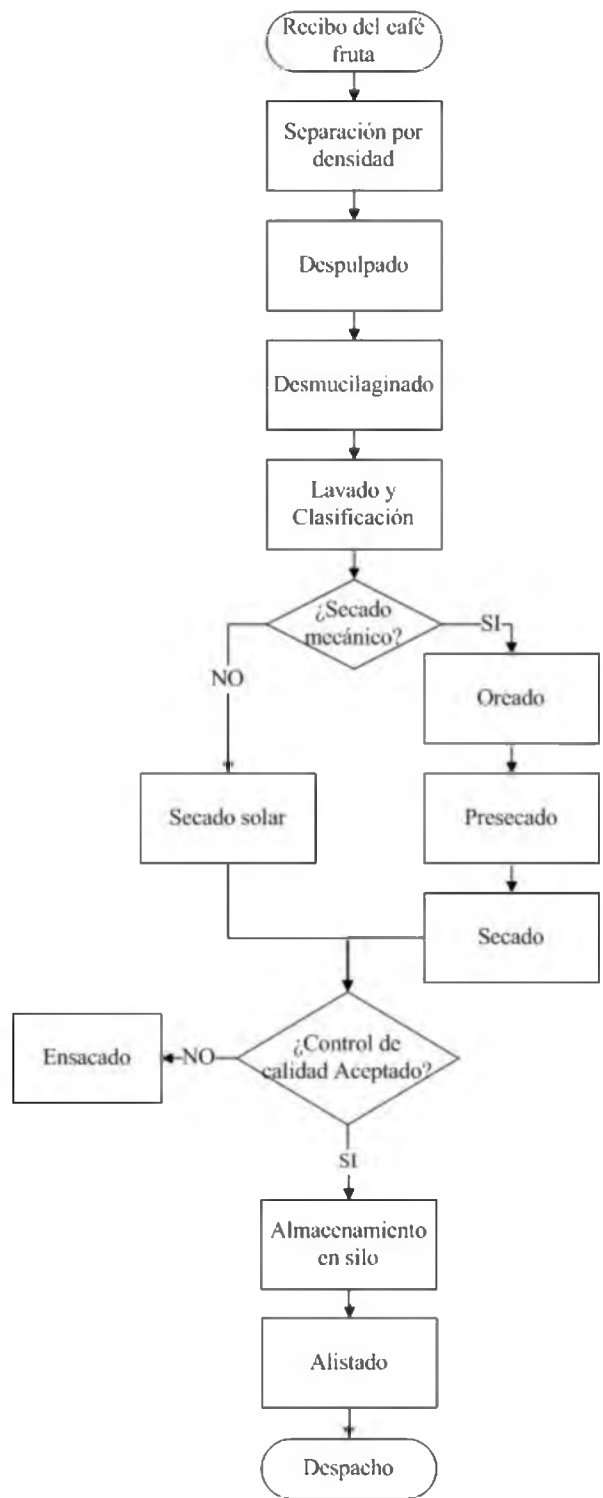


Figura 17. Diagrama de flujo Beneficio San Diego.

5.4 Modelo de balance de masa en café.

La empresa ha recolectado y validado datos durante años los cuales son actualmente utilizados para sus cálculos. Estos valores reportados para la cosecha 2017-2018, se utilizaron para establecer el balance de masa que sirvió de base para la simulación. Se considera que de los 255 kg de café fruta que componen una fanega, se distribuyen en 104,5 kg de broza (cáscara y mucílago) y 150,5 kg de café despulpado, que contienen 40,8 kg de mucílago. Al finalizar el proceso de desmucilaginado, se obtiene una masa de 109,7 kg de café húmedo. El secado debe evaporar 51 kg de agua de los granos, quedando 58,7 kg de café en pergamino seco. Por último, el café debe ser despergaminado para obtener el café oro, operación que le remueve 11,5 kg, lo que da como resultado final del beneficiado una masa de 47,2 kg de café oro al 12% contenido de humedad en base húmeda. La Figura 18 muestra el conjunto de operaciones unitarias con sus respectivos flujos de masa de todo el proceso de beneficiado por la vía húmeda.

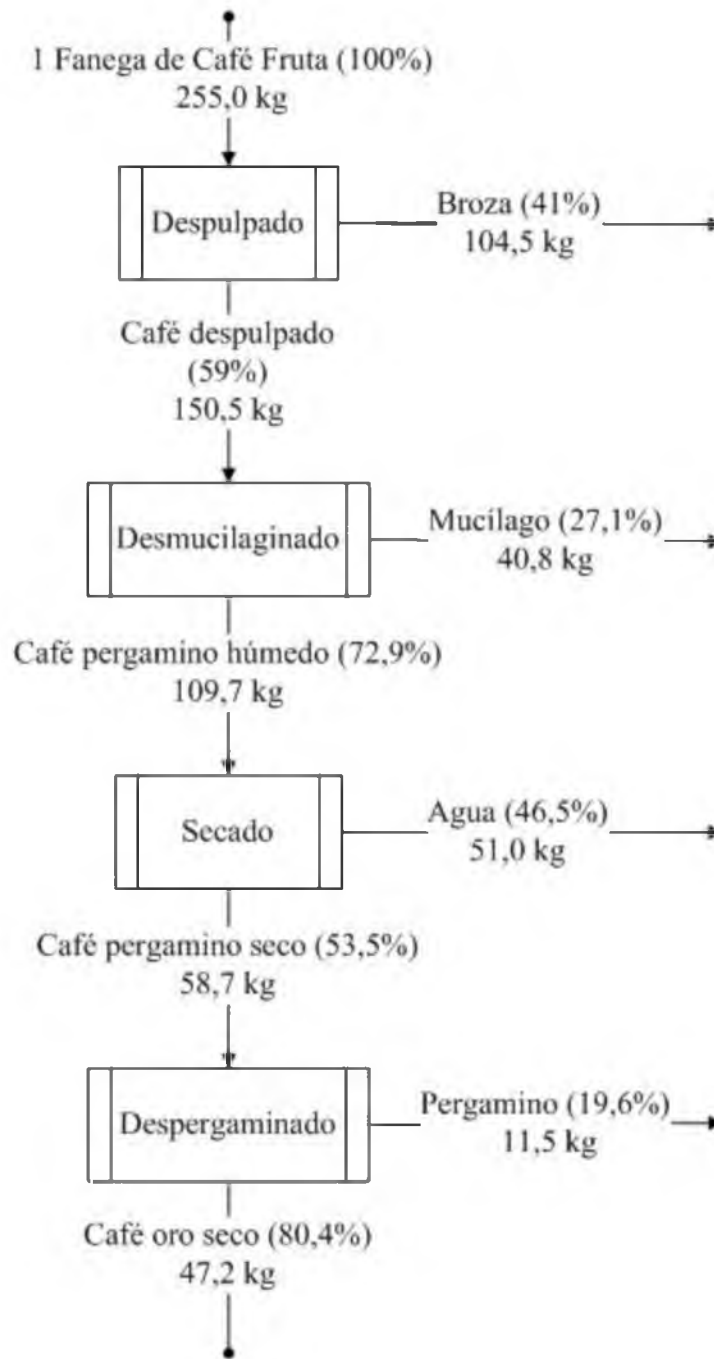


Figura 18. Balance de masa para la obtención de café oro al 12% b.h. en el Beneficio San Diego.

El rendimiento del café obtenido en la agroindustria de 18,5% es semejante con los cafés arábicas brasileños donde se indica un rendimiento del 20%, calculados a partir de 8,2 L cuya masa corresponde a 5 kg de fruta [14] y del cual se obtiene 1 kg de café beneficiado [13]. Los cafés colombianos reportan un rendimiento de 16 – 18% de café oro [23]. En Costa Rica se espera que el rendimiento de una fanega (400 L) de café en fruta produzca 1 quintal exportable de café oro (46 kg), es decir el 18,4% de la masa en fruta (250 kg). De acuerdo con el balance de masa realizado en el beneficio, el factor de conversión de fruta a oro es de 18,47% pues al final del proceso en SDI de 255 kg de café en fruta se obtuvieron 47,1 kg de café oro, dato oficial de la liquidación final de la cosecha 2017-2018 [18]. Estos resultados son comparables con los de Miranda (2018) [33] en su totalidad, pues el rendimiento reportado por él en su investigación fue de 18,5%, dando una diferencia absoluta de 0,03%. En el Cuadro 9 se muestra un comparativo entre los datos obtenidos en el balance de masa a nivel del beneficio y la determinación en el laboratorio.

Cuadro 9. Comparación entre proporciones de masa de laboratorio e industrial.

Proceso	Producto / Subproducto	Industrial %	Laboratorio %	Error %
Despulpado	Cáscara	41,0	40,2	1,95
	Café con mucílago	59,0	59,8	1,36
Desmucilaginado	Mucílago	27,1	35,1	29,52
	Café desmucilaginado	72,9	64,9	10,97
Despergaminado	Pergamino	19,6	20,0	2,04
	Café oro	80,4	80,0	0,50

El porcentaje de error cuantifica las diferencias absolutas porcentuales entre los dos métodos: la determinación experimental a nivel de laboratorio y el dato teórico del beneficio para los procesos de despulpado, desmucilaginado y despergaminado. En todos los casos, el mayor porcentaje de error corresponde al del subproducto, esto puede deberse a que a escala industrial, resulta común darle mayor importancia al producto de interés, pues este continúa en la línea de proceso hasta su etapa final.

Puntualmente, en el caso del desmucilaginado, las máquinas a nivel industrial utilizan agua para la remoción del mucílago y no solamente fricción como en el caso del laboratorio. Esta puede ser la razón por la que existen porcentajes de error de casi 11% y 30% al comparar entre la proporción másica del café desmucilaginado y el mucílago obtenidas en el laboratorio y el beneficio.

5.5 Propiedades físicas del café

Se caracterizaron los productos y subproductos del fruto de café obtenidos en los principales procesos agroindustriales usando el balance de masa para representar la transformación de la materia prima en los productos y subproductos de cada etapa del procesamiento. Las propiedades físicas determinadas fueron el contenido de humedad, la densidad aparente y densidad real.

5.5.1 Productos en cada etapa del proceso

El despulpador en la industria remueve la cáscara con parte del mucílago, lo cual no ha sido aún cuantificado. El descascarado manual del fruto determinó que la cáscara representa aproximadamente el 40% de la masa total, según se observa en el Cuadro 10. Este dato es semejante al reportado por Matos en cafés brasileños [47].

Cuadro 10. Propiedades físicas de los productos obtenidos en el descascarado del fruto de café.

Producto	Descascarado				
	<i>Masa</i> (%)	<i>C. humedad</i> ^a (% b.h.)	<i>D. aparente</i> ^b (kg/m ³)	<i>Densidad real</i> (kg/m ³)	<i>Porosidad</i> (%)
Fruto	100,0	64,54 ± 0,79	651,4 ± 9,6	1120,4 ± 28,4	42
Café con mucílago	59,8 ± 3,7	52,81 ± 0,36	779,4 ± 4,5	1115,0 ± 6,4	30
Cáscara	40,2 ± 3,7	76,30 ± 0,34	293,6 ± 6,5	854,3 ± 43,4	66

^a Contenido de humedad, ^b Densidad aparente

La densidad aparente del fruto obtenida es similar a los trabajos desarrollados por otros investigadores de 616 kg/m³ con un contenido de humedad del 65% b.h. [6].

El contenido de humedad de la cáscara es similar a la obtenida en el despulpado con 75% b.h. [48], mientras que Wintgens reportó 84% b.h. [6]. Esta aparente inconsistencia en la humedad se debe al uso del agua en la agroindustria, por lo que se obtiene un mayor contenido

de humedad superficial en la pulpa. Se comprobó que efectivamente el contenido de humedad en la pulpa extraída del beneficio fue $84,9 \pm 0,4\%$ b.h.

La densidad real tanto de los frutos como del café con mucílago fue mayor que la del aceite, por lo tanto, el 100% de los granos se hundieron. Estas densidades fueron mayores que la densidad del agua; se concluye que la clasificación por flotación en el beneficio fue efectiva. En contraste, la densidad de la cáscara fue menor que la densidad del aceite, pues se observó que la cáscara se mantuvo flotando en la superficie del aceite en todas las pruebas. La densidad real del fruto es semejante a la determinada en tres variedades de cafés brasileños usando otra metodología con 1100 kg/m^3 [49].

El picnómetro puede utilizarse para aproximar la variación del volumen que fue eliminado durante el despulpado mecánico con respecto al descascarado manual, tal método aún no ha sido comparado con otras técnicas utilizadas para la determinación de la densidad real en granos [50].

El mucílago es eliminado mecánicamente y el café debe lavarse antes de entrar a la presecadora de alto flujo de aire conocida como oreadora. En el Cuadro 11 se tiene que la humedad a la salida de la oreadora es aproximadamente el 50% b.h. Este resultado es similar con el rango de humedad de 52,7 a 53,5% b.h., reportado en cafés colombianos [51]

Cuadro 11. *Propiedades físicas de los productos obtenidos en el desmucilaginado del fruto de café.*

Producto	Desmucilaginado				
	<i>Masa</i> (%)	<i>C. humedad</i> (% b.h.)	<i>D. Aparente</i> (kg/m ³)	<i>Densidad Real</i> (kg/m ³)	<i>Porosidad</i> (%)
Café oreadora	s.d.	49,08 ± 0,77	632,2 ± 2,6	1115,3 ± 6,4	43
Mucílago	35,1 ± 1,2	92,0 ± 0,5	Líquido	677,0 ± 31,2	-
Café lavado	64,9 ± 1,2	49,08 ± 0,38	647,2 ± 2,0	854,5 ± 43,5	24

Es posible apreciar en el cuadro 12 el efecto que tiene la disminución del contenido de humedad sobre la densidad aparente de la masa de granos, aunque este efecto se manifiesta de forma más definida sobre la densidad real. En el caso de la porosidad, esta presenta un valor inicial de 43%, disminuye al 23% en el café presecado, pero vuelve al valor inicial en el café pergamino seco. Esta propiedad física es importante para determinar la cantidad de aire intergranular y espacio no utilizado en un contenedor, lo cual afecta la capacidad de almacenamiento de los granos [50].

Cuadro 12. Propiedades físicas de los productos obtenidos en el secado del café con pergamino.

Producto	Secado			
	<i>C. humedad</i> (% b.h.)	<i>Densidad</i> <i>Aparente</i> (kg/m ³)	<i>Densidad</i> <i>Real</i> (kg/m ³)	<i>Porosidad</i> (%)
Café pergamino húmedo	49,08 ± 0,77	632,2 ± 2,6	1115,3 ± 6,4	43
Café pergamino presecado ^a	34,96 ± 0,10	519,8 ± 4,1	677,2 ± 31,2	23
Café pergamino seco	10,03 ± 0,15	418,0 ± 4,9	738,4 ± 29,7	43

^a café en pergamino que proviene de salida de presecadora vertical después de 9,5 h.

La densidad aparente de referencia para el café con pergamino húmedo y seco fue 665 y 352 kg/m³, con humedades de 55 y 12% b.h. respectivamente [6]. La densidad aparente del café seco fue reportada por variedades y según el contenido de humedad y la densidad, es similar a la variedad Mundo Novo [52].

Con los datos de densidad aparente es posible calcular el costo y cantidad de viajes necesarios para el transporte de café en cualquier punto de su transformación, práctica común en el Beneficio San Diego por temas de capacidad de secado y almacenamiento. De igual forma con la broza, la cual es transportada a tratamiento externo.

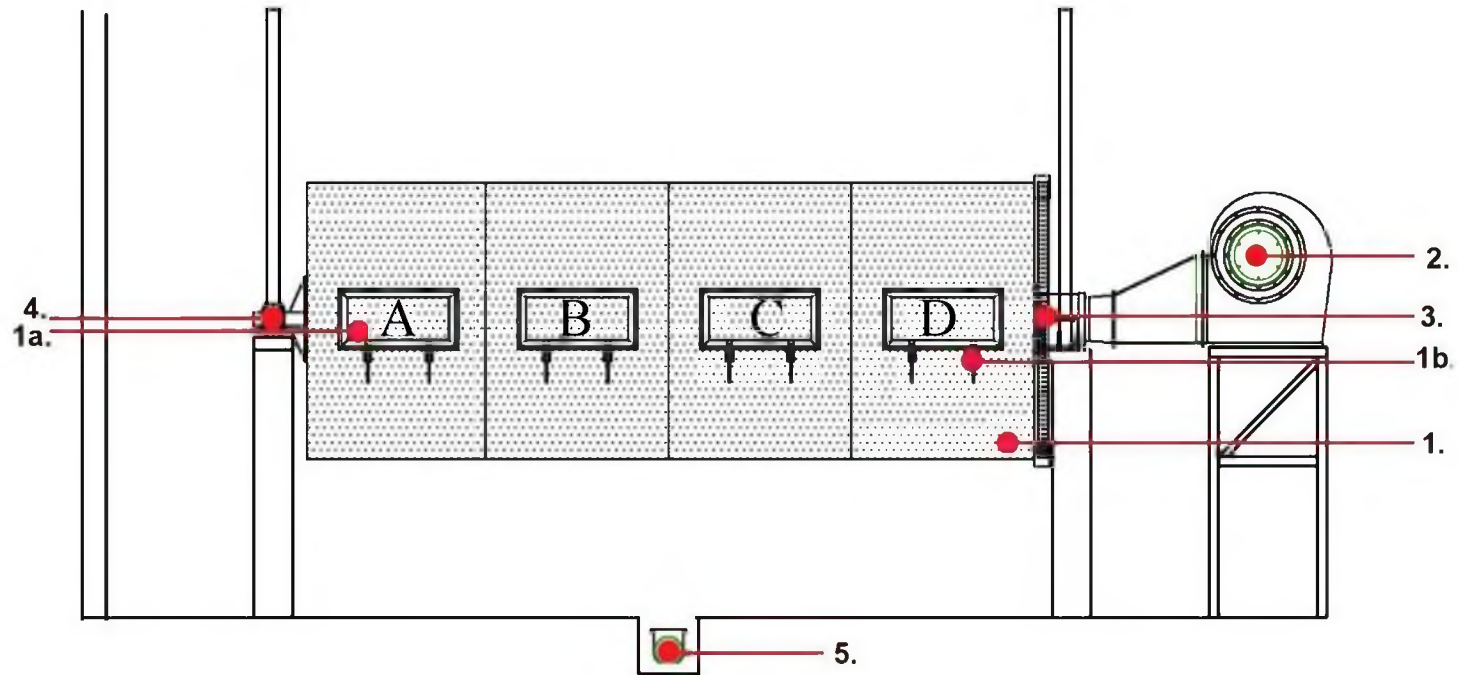
En el Cuadro 13, se observa que aproximadamente un 20% de la masa de café pergamino seco corresponde al pergamino y el 80% restante al grano oro. A pesar de que el contenido de humedad de los productos se aproximan entre ellos, la densidad aparente del grano oro es en promedio casi 2 veces el valor de densidad aparente del café pergamino seco y casi 5 veces el valor de densidad aparente del pergamino. Interesantemente, la densidad real mayor fue la del pergamino, seguido por la del café oro y en último lugar la del café pergamino seco. En el caso de la porosidad, el café pergamino seco y el café oro compartieron el valor de 43% de porosidad, mientras que el pergamino fue poco más que el doble de este.

Cuadro 13. *Propiedades físicas de los productos obtenidos en el despergamino del café.*

Producto	Despergamino				
	<i>Masa</i> (%)	<i>C.</i> <i>Humedad</i> (% b.h.)	<i>D.</i> <i>Aparente</i> (kg/m ³)	<i>Densidad</i> <i>Real</i> (kg/m ³)	<i>Porosidad</i> (%)
Café en pergamino seco	100,0	10,03± 0,15	424,0 ± 2,0	738,4 ± 29,7	43
Café oro	80 ± 1,0	10,15± 0,17	706,4 ± 3,4	1243,0 ± 8,0	43
Pergamino	20 ± 0,8	10,08 ± 0,05	155,9± 4,1	1350,9 ± 62,2	88

5.6 Modelado del secado en capa delgada del café en guardiola

En la Figura 19 se muestra un diagrama que especifica las cuatro compuertas de la guardiola donde se tomaron las muestras en el estudio de Porter [24]. El Cuadro 14 muestra los coeficientes estimados, la constante de secado y el coeficiente de determinación de cada uno de los modelos matemáticos de secado en capa fina aplicados a los datos de secado de la Guardiola 4 de SDI. También se muestran las curvas de ajuste correspondientes en las Figuras **20** Figura 21 y Figura **22**.



- | | |
|---|--|
| 1. Tambor rotativo | 3. Sustentación y apoyo conjunto de engranajes y motor eléctrico |
| 1a. Puerta basculante para carga y descarga | 4. Sustentación del eje giratorio |
| 1b. Cerrojo | 5. Transportador Helicoidal |
| 2. Ventilador | |

Figura 19. Vista lateral de una secadora cilíndrica rotativa (guardiola).

En la última columna del Cuadro 14 se indica el coeficiente de determinación calculado por SigmaPlot 12.0, que es el parámetro utilizado para cuantificar la bondad del ajuste de la curva de regresión. En estos tres casos, el coeficiente logra explicar el comportamiento de la razón de humedad en más de un 95% lo cual es un indicador de que el secado mecánico horizontal rotativo en guardiola se aproxima adecuadamente a un secado en capa fina.

Cuadro 14. Ajuste de modelos matemáticos de secado utilizados en capa fina aplicados a la Guardiola 4 del Beneficio San Diego según datos reportados por Porter* [24].

Nombre	Ecuación	Coefficientes y constantes	R ²
Page	$MR_t = \exp(-kt^n)$	$k = 0,1105$ $n = 1,0286$	0,9654
Lewis	$MR_t = \exp(-kt)$	$k = 0,1180$	0,9652
Midilli Modificado	$MR_t = \exp(-kt) + bt$	$k = 0,1047$ $b = -0,0032$	0,9709

* b y n son coeficientes estimados, n la constante de secado y t el tiempo de secado en horas.

Se seleccionó el modelo de Midilli Modificado, con un coeficiente de determinación de 0,9709, por ser el mayor de los tres, el cual se validó con los datos de la segunda evaluación de la guardiola 4, utilizando los parámetros de análisis estadístico de error medio absoluto, error cuadrático medio, y la raíz del error cuadrático medio.

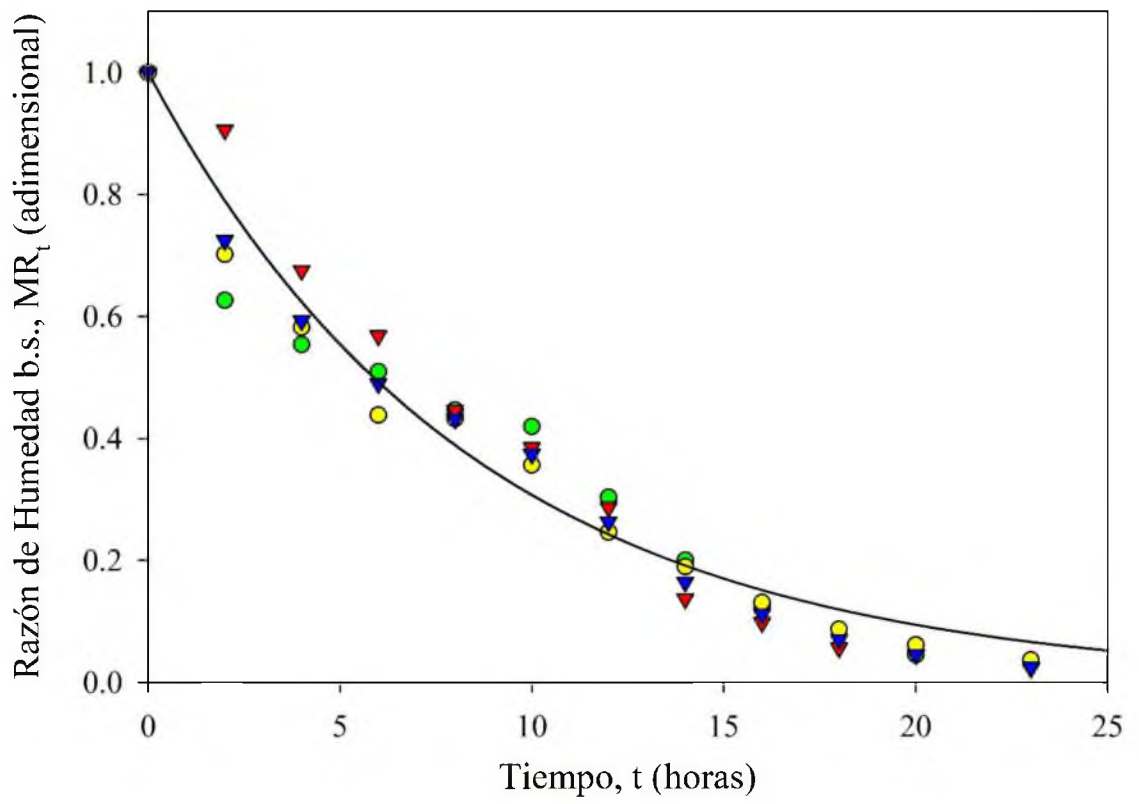


Figura 20. Ajuste Modelo de Lewis de capa fina al secado mecánico en la Guardiola 4.

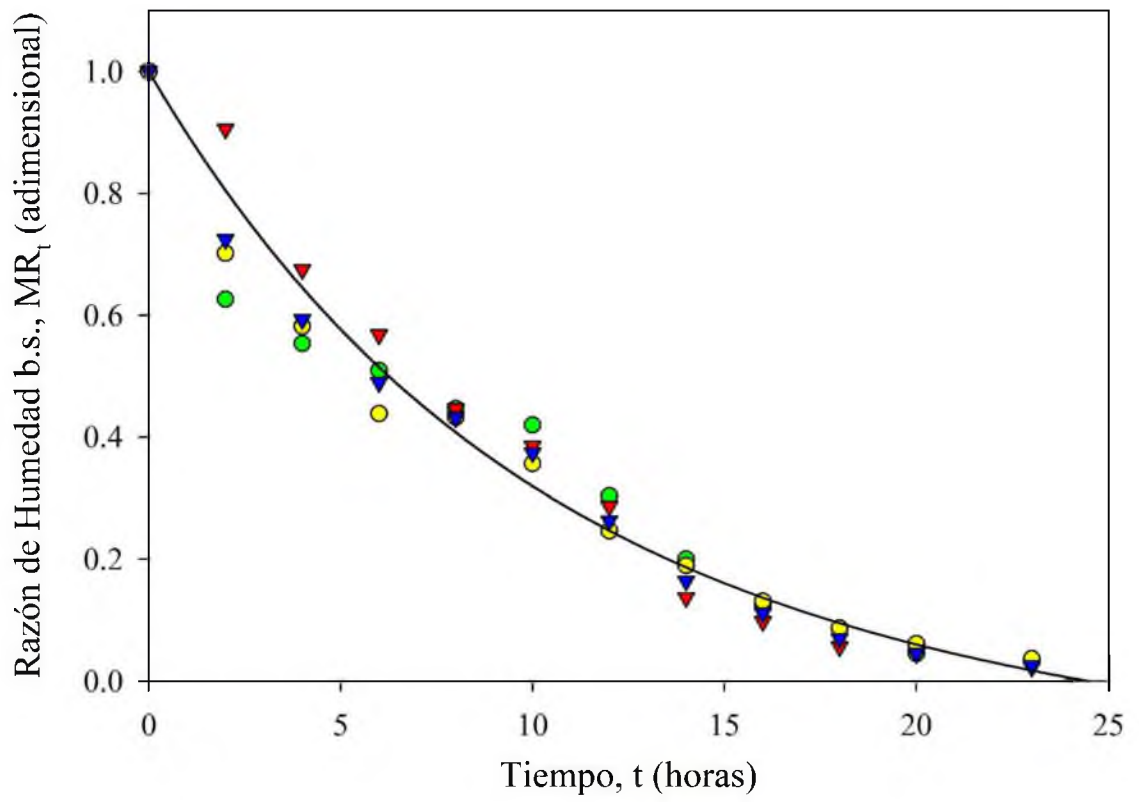


Figura 21. Ajuste Modelo de Midilli Modificado de capa fina al secado mecánico en la Guardiola 4.

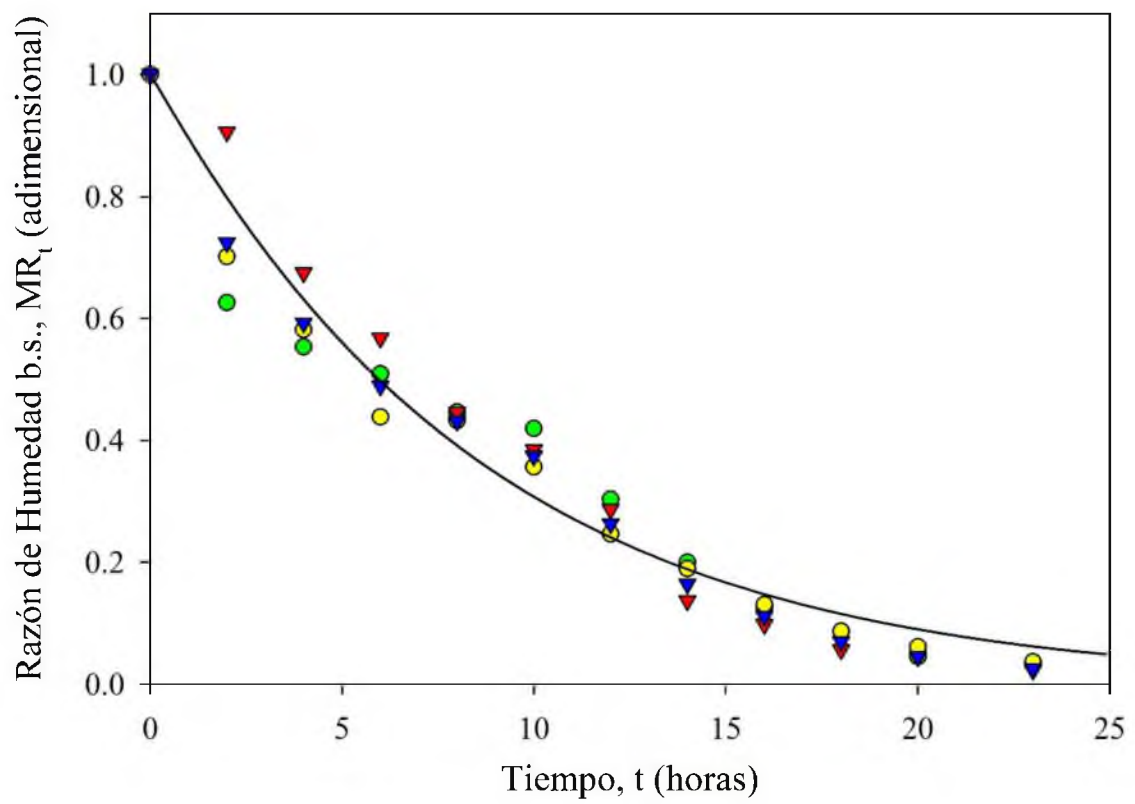


Figura 22. Ajuste Modelo de Page de capa fina al secado mecánico en la Guardiola 4.

El secado en el sistema de guardiola facilita el movimiento de los granos a través de su rotación a 1,5 revoluciones por minuto y también a la acción de los desviadores internos de la secadora. Adicionalmente, el interior de la guardiola es un régimen turbulento dado el caudal del aire: 12 000 m³/h, el diámetro del ducto de salida del ventilador: 40 cm y la temperatura del aire de secado: 60°C. Por lo tanto, se aumenta la probabilidad que todos los granos estén expuestos a condiciones constantes del aire de secado como en el caso del secado de capa delgada, donde evita no solamente el gradiente de humedad sino el térmico.

A partir de los parámetros estimados y la constante de secado obtenidas con los datos de la primera evaluación, se calcularon las predicciones del modelo y se compararon contra los datos observados de la segunda evaluación. En el caso de un ajuste perfecto entre la predicción y lo observado, el coeficiente de determinación es igual a la unidad y en este caso, el valor de este es de 0,9829. Lo anterior es congruente con los valores promedio del error medio absoluto, el error cuadrático medio y la raíz del error cuadrático medio, los cuales son 0,058, 0,005 y 0,067 respectivamente. Tomando en cuenta los parámetros anteriormente expuestos es posible afirmar que el secado de café en guardiola, bajo las condiciones de este estudio, se comporta como un secado en capa fina y se puede representar mediante el modelo matemático de Midilli modificado.

El Cuadro 15 muestra los datos predichos y observados para cada una de las secciones y la Figura 23 muestra la validación del modelo de Midilli Modificado sobre la razón de humedad en la guardiola 4 del beneficio San Diego a las condiciones dadas.

Cuadro 15. Comparación entre datos predichos y observados en la segunda evaluación de la guardiola 4.

Tiempo (h)	Predicción	MR _A Observado	MR _B Observado	MR _C Observado	MR _D Observado
0,00	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
1,50	0,850	0,947	0,982	0,855	0,864
4,50	0,610	0,651	0,499	0,490	0,657
7,50	0,432	0,365	0,365	0,335	0,328
10,50	0,300	0,219	0,266	0,243	0,232
13,50	0,201	0,114	0,133	0,146	0,098
15,50	0,148	0,076	0,078	0,098	0,063
17,50	0,105	0,046	0,044	0,071	0,038
19,50	0,068	0,035	0,040	0,046	0,033

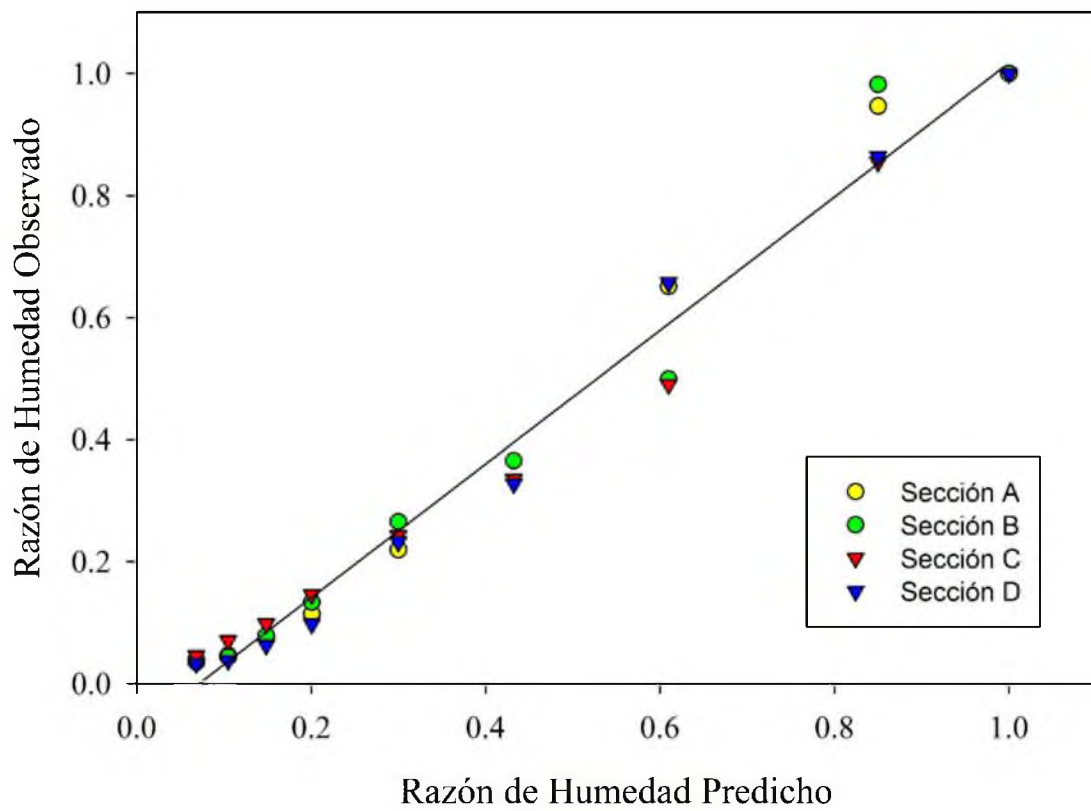


Figura 23. Validación del modelo matemático de Midilli Modificado.

Por las características de la guardiola, la transferencia de calor y masa es uniforme desde el inicio del proceso de secado, pues todos los granos están expuestos a las mismas condiciones de secado sin importar su posición relativa y velocidad angular constante durante el proceso.

Al representarlo matemáticamente a través de una ecuación exponencial, específicamente el modelo de Midilli Modificado, la razón de humedad puede ser explicada para las condiciones de operación de caudal y temperatura del aire de secado, 12 000 m³/h y 60°C y contenido de humedad b.h. inicial y final del grano 35% y 12% respectivamente, utilizados en la guardiola 4 del Beneficio San Diego. La calidad de este ajuste permite confirmar lo mencionado anteriormente, que el secado dentro del sistema es homogéneo y no existe un gradiente o frente de secado, característico de un proceso de secado de capa fina.

5.7 Simulación del proceso de beneficiado del café

El Cuadro 16 muestra la distribución de frecuencias para cada marca de clase respectiva, que fue el insumo principal para realizar la simulación de Montecarlo, tal como se detalló anteriormente.

Cuadro 16. Distribución de frecuencias del tiempo entre llegadas del fruto al beneficio.

Marca de clase (segundos)	Frecuencia
8,00	0,02%
11,66	12,45%
15,32	47,64%
18,97	18,88%
22,63	8,84%
26,29	3,82%
29,95	1,66%
33,60	1,35%
37,26	0,86%
40,92	0,46%
44,58	0,46%
48,23	0,36%
51,89	0,20%
55,55	0,25%
59,21	0,19%
62,86	0,13%
66,52	0,15%
70,18	0,14%
73,84	0,10%
77,49	0,12%
81,15	0,12%
84,81	0,08%
88,47	0,10%
92,12	0,09%
95,78	0,07%
99,44	0,07%
103,10	0,07%
106,75	0,06%
110,41	0,05%
114,07	0,06%
117,73	0,04%
121,38	0,06%
125,04	0,05%
938,84	1,01%

De esta distribución de frecuencias, queda en evidencia la alta variabilidad con que el producto ingresa a las instalaciones, lo que agrega complejidad a las operaciones, sin embargo, se puede decir que cerca del 80% de las veces, se toma entre 11,7 – 19,0 segundos recibir cada fanega (255 kg).

La

Figura **24** muestra el diagrama de flujo del proceso, donde se transforma el café fruta en café oro, desde el recibo hasta el almacenamiento en el Beneficio San Diego, que fue el esquema principal bajo el cual se ejecutó la simulación:

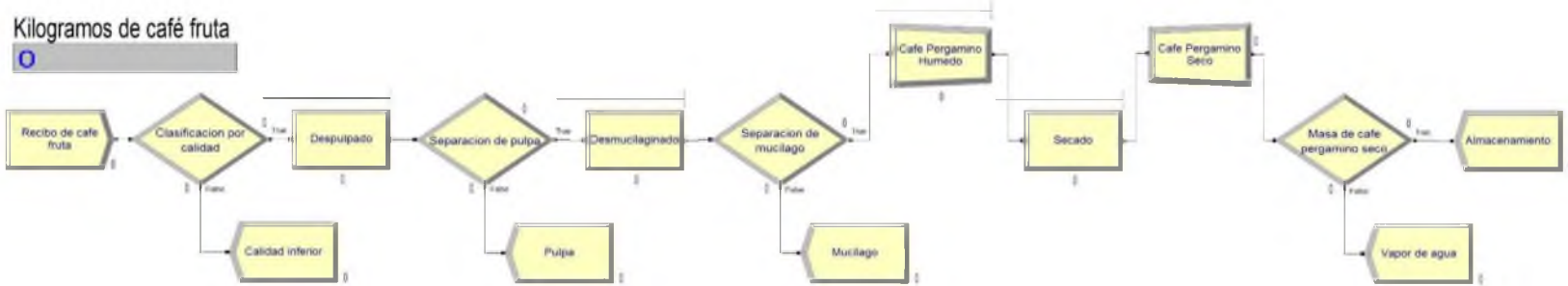


Figura 24. Flujograma del proceso de beneficiado húmedo de café y diagrama de flujo de la simulación en Arena.

Una vez terminada la simulación, realizada para cinco días en pico de cosecha, se procesaron en promedio 2 718 392,33 kg de café fruta o 10 660 fanegas aproximadamente. Se obtuvo una masa de 1 776 769,33 kg de café pergamino seco que llegó al módulo del almacenamiento, lo que representa una productividad del 65,36%. Además, el trabajo en proceso promedio (WIP, por sus siglas en inglés, que se refiere a la cantidad de producto que aún se encuentra dentro del proceso como un inventario), es de 472 596,11 kg, correspondientes a producto que no se terminó de procesar por completo durante los 5 días.

El tiempo de espera promedio simulado (de un producto que se encuentra en fila para ser procesado) en la operación de despulpado es de 0,0012 h (4,32 min) mientras para el desmucilaginado es de 0,16 s, lo que indica que hasta entonces la línea se comporta como una operación de flujo continuo.

En contraste, en el secado esta situación se vuelve una operación por lotes, con aproximadamente 41,70 h de tiempo de espera promedio, según los resultados de la simulación. Visto de otra manera, antes del despulpado, se esperaría que haya un tamaño promedio de fila de 25,36 kg de café en espera de ser procesado, 54,21 kg de café ya despulpados y en espera de ser desmucilaginados y 41 004,00 kg de café en pergamino húmedo a la espera de ser secado en el intervalo de la simulación de 5 días.

La utilización de un recurso se define como la proporción del tiempo disponible que el recurso está en operación para agregar valor al producto, por ejemplo, tal como se puede observar en la Figura 25, el recurso con la mayor utilización del sistema durante la simulación

es el secado mecánico en guardiolas (98,58%), seguido del despulpado (48,51%) y el desmucilaginado (36,63%).

Esta utilización de 98,58%, resalta el hecho de que efectivamente el secado mecánico en las guardiolas es el recurso que restringe la capacidad del sistema, es decir representa un cuello de botella y a la vez advierte que la capacidad del sistema puede verse comprometida, con cualquier cambio en el flujo de producto o algún problema de funcionamiento del equipo, ya que se recomienda que la utilización de los recursos no sobrepase el 85%, como medida de protección del proceso. Estos números también reflejan el hecho de que el equipo de secado, en época de cosecha, opere durante las 24 horas del día, en tanto que la parte húmeda en promedio opera entre 10 – 12 horas.

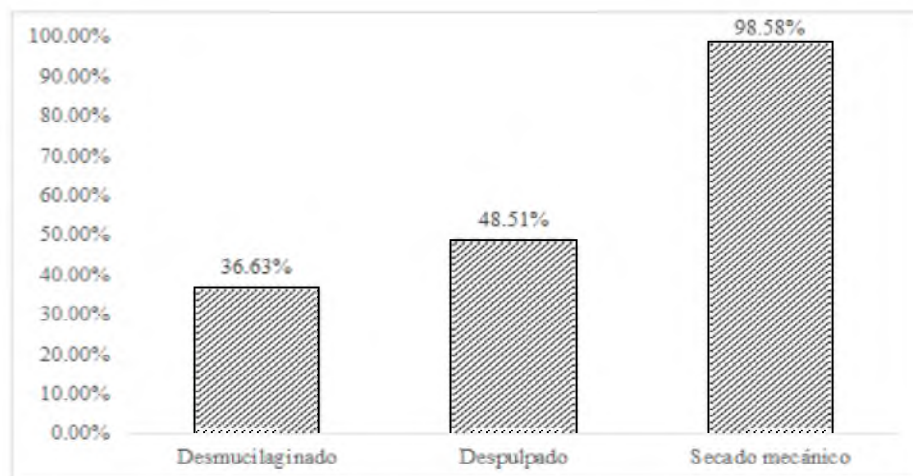


Figura 25. Utilización relativa de cada uno de los recursos en el beneficiado de café.

Con base en la figura anterior, resultado propio del software Arena®, se puede decir que el desmucilaginado y el despulpado, tienen un exceso de capacidad para las condiciones simuladas, debido a que su porcentaje de utilización no supera el 37% en el primer caso ni el

50% en el segundo. Con esto, podría evaluarse la posibilidad de no utilizar todas las unidades disponibles de cada recurso y sólo aquellas que sean necesarias para abastecer el ritmo de producción del cuello de botella (secado en guardiolas), como una forma de reducir costos y disminuir el inventario en proceso (WIP).

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

1. Se analizó el beneficiado de café en el Beneficio SDI de forma sistémica, tomando en cuenta la capacidad instalada en la planta, el contexto de sus operaciones, el balance másico, el secado mecánico y la capacidad del sistema frente a variaciones en el recibo de fruta mediante una simulación de Montecarlo.
2. Se estimaron los valores de rendimiento másico de cada una de las actividades dentro del proceso de beneficiado hasta obtener café oro. Se determinó que, mediante el despulpado, el desmucilaginado y el despergaminado se remueve el 61,5% de la masa del fruto, lo que quiere decir de forma teórica, que de la masa de fruta recibida un 18,5% se convierte en café oro.
3. Esta proporción entre la masa del fruto y el café oro es de 5,4 a 1 respectivamente. Es consistente con los ámbitos descritos entre las variedades de café arábica.
4. Es posible describir las características físicas de productos y subproductos del café obtenidos en las etapas del procesamiento agroindustrial en términos de contenido de humedad, la densidad real y aparente, así como también la porosidad, con los equipos utilizados.

5. La operación de secado por lotes en equipo horizontal rotativo (guardiola) puede ser representada mediante el modelo matemático de secado en capa delgada según ecuación de Midilli modificado, con un coeficiente de determinación de 0,9709 para las condiciones dadas.

6. Se simuló el procesamiento de café desde el fruto hasta el café pergamino seco y se determinó que la etapa del proceso con la mayor utilización es el secado, con un 98,58%, siendo el recurso que restringe la capacidad del sistema.

6.2 Recomendaciones

La mayoría de los equipos son diseñados para operar en forma continua lo cual impide medir con facilidad los productos obtenidos, además, hay pocos controles de peso (o volumen) entre procesos. El reto a nivel agroindustrial es contabilizar tanto la cantidad de producto elaborado como la cantidad de residuos obtenidos durante el procesamiento agroindustrial.

Se recomienda hacer extensivo este estudio en empresas de menor escala y determinar el consumo energético de cada una de las operaciones unitarias para validar su aplicación en estas condiciones.

Se exhorta a la empresa a realizar un estudio a nivel operativo tomando en cuenta el tiempo necesario para la limpieza de los equipos, vitales para el aseguramiento de la calidad, para determinar si es factible ajustar el número de equipos utilizados en las operaciones de despulpado y desmucilaginado, de acuerdo con el ritmo de producción de las guardiolas con el propósito de minimizar los costos operativos.

7. ANEXOS

ANEXO A

Distribución mensual consumo energético y máxima demanda del Beneficio San Diego cosecha 2017-2018 (**Error! Reference source not found.**13 y 14) páginas 51 y 52.

Mes	Consumo Energía kWh	Máxima Demanda de Potencia kW
Octubre 2017	41 859	52,76
Noviembre 2017	202 550	712,43
Diciembre 2017	334 997	684,60
Enero 2018	338 308	693,00
Febrero 2018	238 500	623,70
Marzo 2018	63 666	53,81
Abril 2018	26 708	147,00
Mayo 2018	25 118	32,03
Junio 2018	29 750	31,50
Julio 2018	36 484	27,83
Agosto 2018	24 345	24,94
Setiembre 2018	13 546	34,65
TOTAL	1 375 831	3 118,25

ANEXO B

Tabla de conversión de café fruta para el Beneficio San Diego

CAFÉ FRUTA		A:					
		Fanega	Angarilla	Cajuela	Cuartillo	Litros	Kilogramos
DE:	Fanega	1	2	20	80	400	255
	Angarilla	0,5	1	10	40	200	127,5
	Cajuela	0,05	0,1	1	4	20	12,75
	Cuartillo	0,0125	0,025	0,25	1	5	3,1875
	Litros	0,0025	0,005	0,05	0,2	1	0,6375
	Kilogramos	0,0039	0,0078	0,0784	0,3137	1,5686	1

Para utilizar correctamente la tabla de conversión anterior, se toma el valor inicial desde el que se desea convertir en las filas de la izquierda y se multiplica por el valor en la intersección con la columna correspondiente. Se ejemplifica de la siguiente manera: Si se tienen 140 cajuelas y se quiere saber a cuántas fanegas equivale, se multiplica 140 por 0,05 fanegas/cajuela lo que da como resultado 7 fanegas. Análogamente, si se quieren expresar esas 140 cajuelas en kilogramos, se multiplica 140 por 12,75 kg/cajuela lo que da como resultado 1 785 kilogramos de café fruta. Es importante aclarar que en el caso de este beneficio, la masa de una fanega se considera en promedio igual a 255 kilogramos. Si se desea usar en otro beneficio, deberá tomarse el valor correspondiente y corregir los valores.

8. GLOSARIO

Angarilla: También conocida como medida. Es el nombre común en Costa Rica para el mecanismo en el que se lleva a cabo la medición volumétrica del café en recibidores y beneficios de café. Tiene una capacidad de 200 litros.

Café oro: Este es el producto final del beneficiado de café. El café verde, como se le conoce comercialmente, es vendido por lo general a las exportadoras y estas posteriormente lo venden a las empresas tostadoras nacionales e internacionales.

Café pergamino: es como se le conoce al café en la etapa intermedia entre el café fruta y el café oro. Este puede ser café pergamino húmedo, después del despulpado y antes del secado, o bien café pergamino seco, después del secado y antes del despergaminado o trillado del café. En esta etapa se utiliza la unidad de quintales, los cuales hacen referencia a quintales de café oro equivalentes.

Cajuela: Es la veintava parte de una fanega. Equivale a 20 litros de café fruta. Es utilizada normalmente para mediciones volumétricas inferiores a media fanega

Caño despedrador: Es un tanque similar a un sedimentador en el que se remueve materia extraña del café fruta, en su mayoría, piedras, tierra, palos, metales, previo a ingresar al módulo de despulpado.

Chancador: Es el nombre común en Costa Rica de los despulpadores mecánicos de café.

Chasparria: Este término hace referencia al grano que se secó en la planta de café. Se caracteriza por su aspecto físico corrugado, de color marrón a negro, que no tiene granos de café adentro; precisamente por esta razón flota al ser transportado con agua.

Cuartillo: Es la unidad más pequeña en la que se puede medir volumétricamente el café fruta en Costa Rica. Equivale a la cuarta parte de una cajuela, es decir a 5 litros de café fruta.

Delva: Nombre común de las desmucilagadoras mecánicas de café.

Fanega: Es la unidad popularmente utilizada en Costa Rica para referirse a 400 litros de café fruta. Para el ICAFE la unidad de medida oficial del café fruta en Costa Rica es el doble hectolitro, es decir 200 litros. La fanega entonces corresponde a dos dobles hectolitros de café fruta y solamente es aplicable el término cuando el café se encuentra en fruta.

Flotes: Se refiere a los granos de café vanos, brocados o granos chasparria que son de menor densidad y que por ende flotan y son separados en el sifón espumador.

Guardiola: Se le conoce con este nombre, en honor a su inventor, a la secadora cilíndrica horizontal rotativa utilizada ampliamente en el secado de café a nivel industrial.

ICAFE: Instituto del Café de Costa Rica. Es la máxima autoridad que regula la caficultura en el país y su principal objetivo es velar por la correcta implementación de la Ley 2762, su reglamento y sus reformas.

Quintal: Es una cantidad equivalente a 100 libras o aproximadamente a 45,36 kilogramos de café oro. Por lo general, al quintal se le considera equivalente a 46 kilogramos de café oro.

Esta unidad se utiliza para referirse al café una vez removida la pulpa hasta el estado de café oro.

Sifón: Es un espacio que sirve para el acopio temporal del café en el beneficio previo a entrar a la línea de proceso.

Sifón Espumador: Corresponde a un tanque en el que se lleva a cabo una separación del café fruta por densidad utilizando el agua como medio de transporte.

Vano: Este es un grano compuesto por solamente un endospermo dentro del mismo fruto, por lo cual tiende a subir a la superficie cuando es sumergido en agua. Forma parte de los flotes que se separan en el sifón espumador.

9. BIBLIOGRAFÍA

1. Instituto del Café de Costa Rica (ICAFE). s.f. Historia del Café de Costa Rica [Internet]. Recuperado a partir de: <http://www.icafe.cr/nuestro-cafe/historia/>
2. Hameed, A., Hussain, S., Ijaz, M., Ullah, S., Pasha, I., Ansar, H. 2018. Farm to Consumer: Factors Affecting the Organoleptic Characteristics of Coffee. II: Postharvest Processing Factors. Institute of Food Technologists. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. [Internet]. Recuperado a partir de: https://www.researchgate.net/publication/328135360_Farm_to_Consumer_Factors_Affecting_the_Organoleptic_Characteristics_of_Coffee_II_Postharvest_Processing_Factors
3. Procomer. 2017. Portal Estadístico de Comercio Exterior [Internet]. Recuperado a partir de: <http://servicios.procomer.go.cr/estadisticas/inicio.aspx>
4. Sistema Costarricense de Información Jurídica. s.f. Ley Sobre Régimen de Relaciones entre Productores, Beneficiarios y Exportadores de Café. Texto completo - Última versión de la norma (6 de 6) del 27 de noviembre del 2001. [Internet]. Recuperado a partir de: http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=36867&nValor3=38867&strTipM=TC
5. National Coffee Association USA. s.f. What is Coffee? [Internet]. Recuperado a partir de: <http://www.ncausa.org/About-Coffee/What-is-Coffee>
6. Wintgens, J. 2004. Coffee Growing, Processing, Sustainable Production: A Guidebook for Growers, Processors, Traders, and Researchers. Wiley-VCH

7. Illy, A., Viani, R. 2005. Espresso Coffee, The Science of Quality. Second Edition. Academic Press.
8. Raghavan B, Ramalakshmi K. 2003. Coffee: A Perspective on Processing and Products. En: Handbook of Postharvest Technology. New York: Marcel Dekker, Inc; p. 697–739. [Internet]. Recuperado a partir de: <http://www.crcnetbase.com/doi/10.1201/9780203911310.pt6>
9. World Coffee Research. 2016. Variedades de Café de Mesoamérica y el Caribe [Internet]. Recuperado a partir de: varieties.worldcoffeeresearch.org
10. Organización Internacional del Café (OIC). 2018. Coffee Market Report October 2018. [Internet]. Recuperado a partir de: <http://www.ico.org/documents/cy2018-19/cm-1018-e.pdf>
11. Centro de Comercio Internacional (ITC). 2011. Guía del Exportador de Café - Tercera edición. 284 págs. [Internet]. Recuperado a partir de: <http://www.intracen.org/guia-del-exportador-de-cafe-tercera-edicion/>
12. Organización Internacional del Café (OIC). 2015. Data concepts and variables used in the statistics of the Organization. SC 59/15 [Internet]. Recuperado a partir de: <http://www.ico.org/documents/cy2014-15/sc-59e-data-concepts.pdf>
13. Carvalho, Gladyston R.; Malta, Marcelo R.; Rezende, Juliana C. 2011. Beneficiamento, Rebeneficiamento e Armazenamento de grãos de café. En: Café Arábica: da pós-colheita ao consumo. Reis, Paulo R.; Cunha, Rodrigo L.; Carvalho, Gladyston R. EPAMIG. Vol.2, 734 p. Lavras, Brasil.
14. Afonso Junior, Paulo C.; Borém, Flavio C.; Corrêa, Paulo C. 2008. Propriedades físicas e térmicas dos frutos e dos grãos de café. En: Pós-colheita do Café. Editor Flávio

Meira Borém. Lavras, Editorial UFLA. 631p. M.G. Brasil.

15. IICA. 2010. Guía técnica para el beneficiado de café protegido bajo una indicación geográfica o denominación de origen. [Internet]. Recuperado a partir de: <https://bootcoffee.com/wp-content/uploads/2014/10/Guia-Tecnica-de-Beneficiado.pdf>
16. Sistema Costarricense de Información Jurídica. s.f. Reglamento a la Ley Sobre Régimen de Relaciones entre Productores, Beneficiadores y Exportadores de Café. Texto completo - Última versión de la norma (13 de 13) del 11 de julio del 2016. [Internet]. Recuperado a partir de: http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=44926&nValor3=105344&strTipM=TC
17. Instituto de Café de Costa Rica (ICAFFE). 2018. Informe sobre la actividad cafetalera de Costa Rica. [Internet]. Recuperado a partir de: http://www.icafe.cr/wp-content/uploads/informacion_mercado/informes_actividad/actual/InformeActividadCafetalera.pdf
18. Instituto del Café de Costa Rica (ICAFFE). 2018. Precio de Liquidación Final Cosecha 2017-2018. [Internet]. Recuperado a partir de: http://www.icafe.cr/wp-content/uploads/liquidaciones_beneficios/Cosecha%201718%20Publicacion%20Liquidacion%20Final.pdf
19. Instituto de Café de Costa Rica (ICAFFE). 2016. Costos de beneficiado de café aceptados por ley No. 2762 cosecha 2015 - 2016. [Internet]. Recuperado a partir de: <http://www.icafe.cr/wp->

content/uploads/informacion_mercado/costos_actividad/beneficiado/ECBC1516.pdf

20. Borém, Flávio M. 2008. Processamento do café. En: Pós-colheita do Café. Editor Flávio Meira Borém. Lavras, Editorial UFLA. 631p. M.G. Brasil.
21. Cleves R. 1998. Tecnología en Beneficiado de Café. San José: Cléves y Faith, S.A.
22. Vargas, G., Mazón, B. 2004. Método para la determinación de humedad en cáscara de café. Revista de Tecnología de Alimentos (REVITECA).
23. Arcila, J., Montilla, J., Aristizábal, M., Montoya, E., Puerta, G., Oliveros, C., Cadena, G. 2008. Avances Técnicos No. 370: Propiedades físicas y factores de conversión del café en el proceso del beneficio. Centro Nacional de Investigaciones de Café - Cenicafé, Colombia. 8p. [Internet]. Recuperado a partir de: <http://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/358/1/avt0370.pdf>
24. Porter, P. 2002. Análisis de sistemas existentes e implementación de nuevas tecnologías de secado de café pergamino a nivel de beneficio. Tesis. San José, Costa Rica, Universidad de Costa Rica, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Agrícola. 112 p.
25. Pinhalense. 2005. Manual de Instalación, Manutención y Operación - Secadoras Rotativas SRE, SRP y SRC. [Internet]. Recuperado a partir de: <https://www.slideshare.net/diosorto/manual-sre-pinhalense-en-espaol>.
26. Chakraverty, A., Singh, R. P.. 2014. Postharvest Technology and Food Process Engineering. Boca Raton: CRC Press.
27. Donzeles, Sérgio M.L.; Sampaio, Cristiane P.; Soares, Sammy F.; Ribeiro, Marcelo F.

2011. Colheita e Processamento do café arábica. En: Café Arábica: da pós-colheita ao consumo. Reis, Paulo R.; Cunha, Rodrigo L.; Carvalho, Gladyston R. EPAMIG. Vol.2, 734 p. Lavras, Brasil.
28. Chen, H., Siebenmorgen, T. J., Marks, B.P. 1997. Relating drying rate constant to head rice yield reduction of long-grain rice. Transactions of the ASAE Vol. 40(4):1133-1139. American Society of Agricultural Engineers. [Internet]. Recuperado a partir de: <https://elibrary.asabe.org/>
29. Selmar, D., Bytof, G., Knopp, S. 2007. The Storage of Green Coffee (*Coffea arabica*): Decrease of Viability and Changes of Potential Aroma Precursors. Oxford University Press. [Internet]. Recuperado a partir de: https://www.researchgate.net/publication/5864555_The_Storage_of_Green_Coffee_Coffea_arabica_Decrease_of_Viability_and_Changes_of_Potential_Aroma_Precursors
30. Jiménez, R., Valverde, R. 1999. Relaciones de humedad de equilibrio para café (*Coffea arabica*) de primera calidad en Costa Rica. Tecnología en Marcha. Vol. 13 no. 2.
31. Carvalhães, N.; Teixeira, R.; Teixeira, A.A.; Brando, C.H.J. 2005. The Raw Bean: Storage. En Espresso Coffee: The science of Quality. Illy A. & Viani R. 2 ed. Elsevier Academic Press. 398p.
32. Alfaro, V. 2015. Efectos de la altitud sobre las características físicas y organolépticas del café de la Zona de Los Santos. Tesis de Licenciatura. San José, Costa Rica, Universidad de Costa Rica, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Agrícola. 146 p.

33. Miranda Ch., A. 2018. El beneficiado del café en Costa Rica. Manuscrito no publicado.
34. Chung, C. 2003. Simulation Modeling Handbook: A Practical Approach. Boca Raton: CRC Press.
35. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. 2009. Regras para análise de sementes - Capítulo 7: Determinação do grau de umidade. Brasília. 1era Ed. 399 p.[Internet]. Recuperado a partir de: http://www.agricultura.gov.br/assuntos/insumos-agropecuarios/arquivos-publicacoes-insumos/2946_regras_analise__sementes.pdf
36. Vargas-Elías, G. 2011. Avaliação das propriedades físicas e de qualidade do café em diferentes condições de torrefação. 114 p. Tesis de Maestría. Ingeniería Agrícola. Universidade Federal de Viçosa. Minas Gerais; Brasil.
37. Bihani, A. 2014. A New Approach to Monte Carlo Simulation of Operations. International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT) – Volume 8 Number 4- Feb 2014 [Internet]. Recuperado a partir de: <http://ijettjournal.org/volume-8/number-4/IJETT-V8P240.pdf>
38. Pekarčíková, M., Trebuňa, P., Markovič, J. 2015. Simulation as part of industrial practice. Acta Logistica - International Scientific Journal about Logistics. Volume: 2 Issue: 2 Pages: 5-8. [Internet]. Recuperado a partir de: https://actalogistica.eu/issues/2015/II_2015_02_Pekarcikova_Trebuna_Markovic.pdf
39. Romanowski, M., Nadolny, K. 2018. Characteristics of the systems of computer modelling and simulation of production processes. Journal of mechanical and energy

- engineering. Vol. 2(42) | No. 2 | June 2018 | pp. 95-100. [Internet]. Recuperado a partir de: <http://jmee.tu.koszalin.pl/ojs/index.php/jmee/article/view/63/44>
40. Corrêa, P., Horta, G., Botelho F., Goneli, A., Carvalho, F. 2010. Modelagem matemática e determinação das propriedades termodinâmicas do café (*Coffea arabica* L.) durante o processo de secagem. [Internet]. Recuperado a partir de: <http://www.scielo.br/pdf/rceres/v57n5/a05v57n5.pdf>
41. Goneli A., Corrêa P., Afonso, P., Oliveira G. 2009. Cinética de secagem dos grãos de café descascados em camada delgada. Revista Brasileira de Armazenamento, Café:64-73. [Internet]. Recuperado a partir de: https://www.researchgate.net/publication/258242741_Cinetica_de_secagem_dos_graos_de_cafe_descascados_em_camada_delgada
42. Instituto del Café de Costa Rica (ICAFFE). 2018. Reporte de Café Recibido Acumulado En unidades de 400 litros al 15/11/2018. [Internet]. Recuperado a partir de: http://www.icafe.cr/wp-content/uploads/comercializacion/cafe_recibido/actual/15%20de%20noviembre%20de%202018%20Cafe%20informado%20-%20Cosecha%2018-19.pdf
43. Puerta Q., G.I. 2010. Avances Técnicos 402: Fundamentos del proceso de fermentación en el beneficio de café. Centro Nacional de Investigaciones de Café - Cicafé. Colombia. [Internet]. Recuperado a partir de: https://www.cenicafe.org/es/index.php/nuestras_publicaciones/consultaPDF/YXZ0MDQwMi5wZGY=
44. Parra C., A.; Roa M., G., Oliveros T., C.E.; Sanz U. J.R. 2018. Optimización operacional

- de secadores mecánicos para café pergamino. Centro Nacional de Investigaciones de Café - Cicafé. Colombia. [Internet]. Recuperado a partir de: <https://www.cenicafe.org/es/publications/librosecado.pdf>
45. Montoya, A. 2002. Análisis de cuatro sistemas de secamiento utilizado en el beneficiado de café (*Coffea arabica*) en Costa Rica. Tesis de Licenciatura. San José, Costa Rica, Universidad de Costa Rica, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Agrícola. 130 p.
46. Hernández, R. 2018. Importancia del reposo del café en pergamino. En entrevista realizada en Café Capris el 19 de setiembre del 2018.
47. Matos, A. T. Tratamento de Resíduos na Pós-Colheita do café. Cap.6. In: Pós-colheita do Café. Editor Flávio Meira Borém. Lavras, Editorial UFLA. M.G., Brasil. 631p.
48. Massey, J. 2016. Coffee: Production, Consumption and Health Benefits. Nova Science Publishers, Incorporated. 180p.
49. Couto, S. M.; Magalhães, A. C.; Queiroz, D. M.; Bastos, I. T. 1999. Massa específica aparente e real e porosidade de grãos de café em função do teor de umidade. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v.3, n.1, p.61-68.
50. Botelho, F. M. et al. 2018. Metodologias para determinação de massa específica de grãos. Revista Agrarian ISSN: 1984-2538. [Internet]. Recuperado a partir de: <http://ojs.ufgd.edu.br/index.php/agrarian/article/view/7922>
51. Sanz – Uribe et al. 2017. Postharvest Processing - Revealing the Green Bean. Cap.3, In: Folmer, B. the Craft and Science of Coffee. Academic Press. Elsevier Inc. 556p.
52. Berbert, P., et al. 2001. Dielectric Properties Parchment Coffee. Journal of agricultural

Engineering Research. Academic Press. [Internet]. Recuperado a partir de:
[https://www.researchgate.net/publication/223334070_PH-
Postharvest_Technology_Dielectric_Properties_of_Parchment_Coffee](https://www.researchgate.net/publication/223334070_PH-Postharvest_Technology_Dielectric_Properties_of_Parchment_Coffee)