



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES

CARRERA DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL

SECADO DE CAFÉ ARÁBIGO *Coffea arábica L.* DE LA VARIEDAD CATURRA MEDIANTE LECHO FLUIDIZADO.

Tesis previa a la obtención del título de Ingeniero Agroindustrial

Autor: Unigarro Bolaños Diego Armando

Director: Ing. Luis Armando Manosalvas MSc.

Ibarra - Ecuador

2017



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS

AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES

CARRERA DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL

SECADO DE CAFÉ ARÁBIGO *Coffea arabica* L. DE LA VARIEDAD CATURRA MEDIANTE LECHO FLUIDIZADO

Tesis revisada por los miembros del tribunal, por lo cual se autoriza su presentación como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGROINDUSTRIAL

APROBADA:

Ing. Luis Manosalvas MSc

DIRECTOR DE TESIS

Ing. Jimmy Cuarán Mg.I

MIEMBRO DEL TRIBUNAL

Ing. José País PhD

MIEMBRO DEL TRIBUNAL

Ramón Cala PhD

MIEMBRO DEL TRIBUNAL

FIRMA

FIRMA

FIRMA

FIRMA



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

La Universidad Técnica del Norte dentro del proyecto Repositorio Digital Institucional, determinó la necesidad de disponer de textos completos en formato digital con la finalidad de apoyar los procesos de investigación, docencia y extensión de la Universidad.

Por medio del presente documento dejo sentada mi voluntad de participar en este proyecto, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO	
CÉDULA DE IDENTIDAD:	040189441-5
APELLIDOS Y NOMBRES:	Unigarro Bolaños Diego Armando
DIRECCIÓN:	Ibarra, El Olivo
EMAIL:	diego-aub30@hotmail.com
TELÉFONO FIJO:	TELÉFONO MÓVIL: 0969519760

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	Secado de café arábigo <i>coffea arábica l.</i> de la variedad caturra mediante lecho fluidizado
AUTOR:	Unigarro Bolaños Diego Armando
FECHA:	20/01/2017
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSTGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero Agroindustrial
ASESOR / DIRECTOR:	Ing. Luis Armando Manosalvas

2. AUTORIZACIÓN DE USO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD

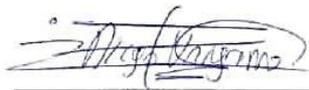
Yo, Diego Armando Unigarro Bolaños, con cédula de identidad número 040189441-5, en calidad de autor y titular de los derechos patrimoniales de la obra o trabajo de grado descrito anteriormente, hago entrega del ejemplar respectivo en formato digital y autorizo a la Universidad Técnica del Norte, la publicación de la obra en el Repositorio Digital Institucional y uso del archivo digital en la Biblioteca de la Universidad con fines académicos, para ampliar la disponibilidad del material y como apoyo a la educación, investigación y extensión; en concordancia con la Ley de Educación Superior Artículo 144.

3. CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 20 días del mes de enero de 2017

EL AUTOR:



Unigarro Bolaños Diego Armando

**CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
GRADO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL
NORTE**

Yo, Diego Armando Unigarro Bolaños, con cédula de identidad número 040189441-5, manifiesto mi voluntad de ceder a la Universidad Técnica del Norte los derechos patrimoniales consagrados en la Ley de Propiedad Intelectual del Ecuador, artículos 4, 5 y 6, en calidad de autor de la obra o trabajo de grado denominado: **SECADO DE CAFÉ ARÁBIGO *Coffea arábica* L. DE LA VARIEDAD CATURRA MEDIANTE LECHO FLUIDIZADO**, que ha sido desarrollado para optar por el título de: **INGENIERO AGROINDUSTRIAL** en la Universidad Técnica del Norte, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente. En condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia suscribimos este documento en el momento que hacemos entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Técnica del Norte.

Ibarra, a los 20 días del mes de enero de 2017



Diego Armando Unigarro Bolaños

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por el señor Diego Armando Unigarro Bolaños, bajo mi supervisión.



Ing. Luis Armando Manosalvas

DIRECTOR DE TESIS

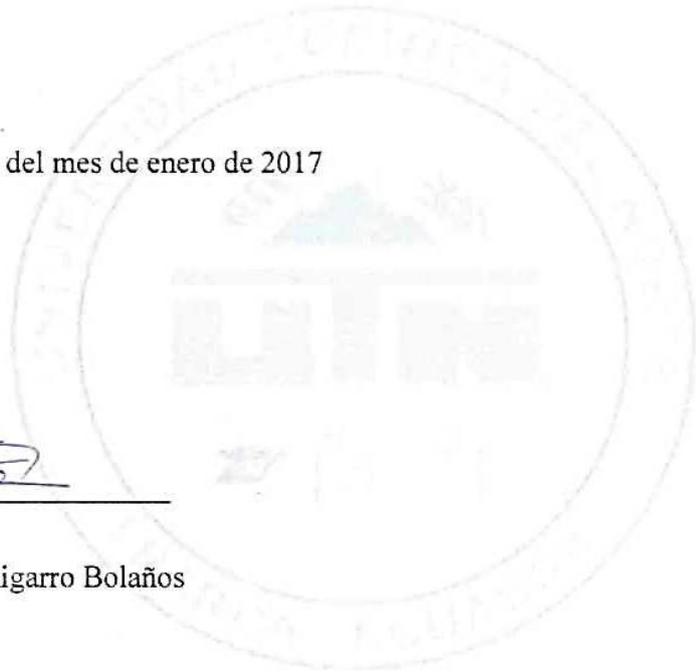
DECLARACIÓN

Manifiesto que la presente obra es original y se la desarrolló sin violar derechos de autor de terceros; por lo tanto es original y que soy el titular de los derechos patrimoniales; por lo que asumo la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldré en defensa de la Universidad Técnica del Norte en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 20 días del mes de enero de 2017



Diego Armando Unigarro Bolaños



DEDICATORIA

A Dios por darme la vida y la fe para mantener a flote mis sueños.

A mi madre NARCIZA BOLAÑOS, por guiarme en cada paso desde temprana edad y formarme como una persona de bien, que a pesar de toda limitación supo apoyarme incondicionalmente ante cualquier circunstancia, principalmente en mi vida como estudiante; por darme su amor cuando necesitaba sentirme vivo, su comprensión y apoyo en momentos difíciles y su hombro cuando sentía que no podía más y necesitaba desahogarme, por su presencia forrada de infinita bondad y valores, los cuales tome como ejemplo para poder cumplir con esta etapa de mi vida, gracias madre con toda mi alma este logro te lo debo a ti.

A mi padre ARMANDO UNIGARRO por apoyarme siempre cuando más necesité de su ayuda.

A mis hermanos JUAN, ANDREA Y DIANA que siempre estuvieron dispuestos a aportar su granito de arena durante mi formación profesional.

Diego Unigarro

AGRADECIMIENTO

Al finalizar con este trabajo debo extender mi sincero agradecimiento a esta prestigiosa institución, Universidad Técnica del Norte, la cual me permitió culminar con mi educación superior y gozar de este privilegio como profesional formado.

A mi director de tesis Ing. Luis Manosalvas quien supo guiarme durante la elaboración del trabajo de grado y supo compartirme sus conocimientos y experiencias.

A mi asesor de tesis Dr. Ramón Cala quien me brindó la oportunidad de trabajar en este proyecto y también por su apoyo permanente durante el desarrollo del trabajo realizado en el laboratorio piloto de secado de granos en lecho fluidizado.

A todos mis profesores quienes formaron parte de mi formación profesional, gracias por sus enseñanzas y valores que nos han permitido reflexionar y sacar buenas experiencias para poder poner en práctica a futuro en cualquier tipo de responsabilidad laboral.

A mis asesores: Ing. Jimmy Cuarán, Dr. José País y Dr. Ramón Cala. Por su apoyo y cumplimiento con su trabajo.

A mis amigos y compañeros que en algún momento difícil me motivaron a seguir adelante y a poner empeño para superar las adversidades.

A Merly Chingal quien supo animarme con muchas palabras de aliento en los momentos más difíciles y confiar en que lo podía lograr.

Diego Unigarro B.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE CONTENIDO.....	i
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
ÍNDICE DE TABLAS	x
ÍNDICE DE GRÁFICOS	xii
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xiii
ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS.....	xiii
RESUMEN.....	xv
SUMARY.....	xvi
CAPÍTULO I.....	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1 PROBLEMA	1
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	2
1.3 OBJETIVOS.....	3
1.3.1 Objetivo General	3
1.3.2 Objetivos Específicos.....	3
1.4 HIPÓTESIS	4
CAPÍTULO II	5
MARCO TEÓRICO	5
2.1 EL CAFÉ.....	5
2.1.1 Taxonomía.....	6
2.1.2 Características	6
2.1.2.1 El fruto	7
2.1.2.2 Contenido nutricional del café.....	8
2.1.2.3 Humedad del café	9

2.2	CAFICULTURA EN EL ECUADOR	9
2.2.1	Zonas geográficas de producción de café en el Ecuador	10
2.2.2	Variedades.....	10
2.2.2.1	Café arábigo.....	11
2.2.2.2	Café Robusta.....	11
2.2.3	Importancia económica y ambiental de la producción de café en el Ecuador	12
2.2.4	Método básico de secado de café.....	13
2.2.4.1	Método de beneficiado en seco.....	13
2.2.4.2	Método de beneficiado en húmedo.....	14
2.2.4.3	Secado de café en lecho fluidizado.....	15
2.3	PROCESO BÁSICO DE SECADO DE ALIMENTOS.....	16
2.3.1	Métodos generales de secado.....	16
2.3.2	Tipos de secadores de alimentos	17
2.3.2.1	Secadores de calentamiento Directo	17
2.3.2.2	Secadores de calentamiento Indirecto.....	20
2.3.3	Secado Convectivo.....	20
2.3.3.1	Transferencia de calor y masa	21
2.3.3.2	Periodos de secado.....	22
2.3.4	Mecanismos de deshidratación	26
2.3.4.1	Capilaridad.....	27
2.3.4.2	Difusión	27
2.3.4.3	Vaporización- Condensación.....	28
2.3.5	Psicrometría en el secado.....	28
2.3.5.1	Propiedades de la mezcla aire- vapor de agua	29
2.4	CONTENIDO DE HUMEDAD DE UN ALIMENTO.....	31

2.4.1	Tipos de humedades	32
2.4.1.1	Contenido de humedad en equilibrio	32
2.4.1.2	Contenido de humedad ligada.....	32
2.4.1.3	Contenido de humedad no ligada.....	33
2.4.1.4	Contenido de humedad libre	33
2.4.2	MEDICIÓN DE LA HUMEDAD.....	34
2.4.2.1	Métodos directos	34
2.4.2.2	Métodos indirectos.....	36
2.4.3	Actividad de agua.....	36
2.5	SECADO POR LECHO FLUIDIZADO.....	38
2.5.1	principio de fluidización	39
2.5.2	Secado de granos en Lecho fluidizado.....	40
2.5.3	tipos de secadores de lecho fluidizado	42
2.5.3.1	Secadores de lecho fluidizado Convencionales	42
2.5.3.1.1	Secador en lotes	42
2.5.3.1.2	Secadores de lecho fluidizado Bien mezclado y Continuo.....	42
2.5.3.1.3	Secadores de lecho fluidizado Semi-continuos	43
2.5.3.1.4	Secadores de lecho fluidizado de Flujo de enchufe	44
2.5.4	cinética de secado fluidizante.....	45
2.5.4.1	Curvas de secado	45
2.5.4.2	Curva de velocidad de secado.....	46
2.5.4.3	Modelos matemáticos de la cinética de secado	47
2.5.5	Efecto de los parámetros de funcionamiento en el secado de lecho fluidizado	55
2.5.5.1	Efecto de la altura del lecho.....	55
2.5.5.2	Efecto del tamaño de partícula.....	56

2.5.5.3	Efecto de la velocidad del gas.....	56
2.5.5.4	Efecto de la temperatura	56
2.5.6	CARACTERÍSTICAS DE UN LECHO FLUIDIZADO.....	56
2.5.6.1	Transferencia de calor en lechos fluidizados	57
2.5.6.2	Anomalías en un lecho fluidizado	58
2.5.6.3	Uniformidad del contenido de humedad en los granos.....	59
2.5.6.4	Calidad de la fluidización	60
2.6	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS ALIMENTOS.....	61
2.6.1	Tamaño.....	61
2.6.2	Esfericidad (\emptyset).....	62
2.6.3	volumen.....	63
2.6.3.1	Método de desplazamiento de líquidos.....	64
2.6.4	Porosidad (ϵ).....	65
2.6.5	Densidad de la partícula (ρ_p)	65
2.6.6	VELOCIDADES RELACIONADAS EN UN LECHO FLUIDIZADO	66
2.6.6.1	Velocidad superficial del gas (U_o)	66
2.6.6.2	Velocidad mínima de fluidización (U_{mf}).....	67
2.6.6.3	Velocidad terminal (U_t)	69
2.6.6.4	Velocidad mínima de burbujeo (U_{mb})	69
2.6.7	Ventajas y desventajas de la utilización de lecho fluidizado en la industria.	69
2.6.7.1	Ventajas del proceso de fluidización	69
2.6.7.2	Desventajas del proceso de fluidización.....	70

CAPÍTULO III	71
METODOLOGÍA	71
3.1 CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	71
3.2 Materiales	71
3.2.1 Materia prima	71
3.2.2 Equipos de Laboratorio	71
3.2.2.1 Maquinaria	72
3.2.2.2 Partes del equipo de fluidización.	72
3.3 MÉTODOS	74
3.3.1 evaluación de las propiedades físicas y gasodinámicas para el café	75
3.3.1.1 Determinación de humedad	75
3.3.1.2 Determinación de la densidad	76
3.3.1.3 Determinación del diámetro medio del grano	76
3.3.1.4 Determinación de la Porosidad	76
3.3.1.5 Velocidad Mínima de Fluidización	77
3.3.2 evaluación de los parámetros de temperatura y velocidad del aire. ..77	
3.3.2.1 Factores en estudio	77
3.3.2.2 Tratamientos	78
3.3.2.3 Características del experimento	78
3.3.2.4 Características de la unidad experimental	78
3.3.2.5 Esquema del análisis estadístico	79
3.3.2.6 Análisis Funcional	79
3.3.3 aplicación DE PULSACIONES AL MEJOR TRATAMIENTO	79
3.3.4 características físicoquímicas del producto seco	81
3.3.5 UNIFORMIDAD DE HUMEDAD EN LOS GRANOS	82

3.4	VARIABLES EVALUADAS.....	82
3.4.1.1	Determinación del tiempo de secado	82
3.4.1.2	Actividad de agua	83
3.5	MANEJO DEL EXPERIMENTO.....	84
3.5.1	Diagrama de flujo del proceso de secado deL <i>café coffea arábica L.</i> mediante lecho fluidizado.....	84
3.5.2	Diagrama deL proceso de secado.....	85
3.5.3	Descripción de las operaciones del proceso de secado de café caturre en lecho fluidizado.....	86
3.5.3.1	Cosecha de las cerezas de café	86
3.5.3.2	Recepción de la materia prima.....	86
3.5.3.3	Lavado	86
3.5.3.4	Selección.....	87
3.5.3.5	Pesado	87
3.5.3.6	Secado.....	87
3.5.3.7	Café seco.....	88
CAPÍTULO IV		89
RESULTADOS Y DISCUSIÓN		89
4.1	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LA MATERIA PRIMA	89
4.1.1	Velocidad mínima de fluidización	91
4.2	ANÁLISIS DE VARIABLES CUANTITATIVAS	92
4.2.1	Tiempo	93
4.2.1.1	Diagrama de Pareto.....	96
4.2.2	CINÉTICA de secado	97
4.2.2.1	Tratamiento T1	98
4.2.2.1.1	Curva de secado T1.....	99

4.2.2.1.2	Tiempo TAU T1	100
4.2.2.1.3	Curva de Velocidad de secado T1	101
4.2.2.2	Tratamiento T2	103
4.2.2.2.1	Curva de secado	104
4.2.2.2.2	Tiempo TAU para T2	105
4.2.2.2.3	Velocidad de secado T2.....	106
4.2.2.3	Tratamiento T3	107
4.2.2.3.1	Curva de secado T3.....	108
4.2.2.3.2	Tiempo de secado TAU para T3.....	109
4.2.2.3.3	Velocidad de secado T3.....	110
4.2.2.4	Tratamiento T4	111
4.2.2.4.1	Curva de secado T4.....	112
4.2.2.4.2	Tiempo de secado TAU para T4.....	113
4.2.2.4.3	Velocidad de secado para T4.....	114
4.2.2.5	Tratamiento T5	115
4.2.2.5.1	Curva de secado T5.....	116
4.2.2.5.2	Tiempo de secado TAU para T5.....	117
4.2.2.5.3	Velocidad de secado T5.....	118
4.2.2.6	Tratamiento T6	119
4.2.2.6.1	Curva de secado para T6.....	120
4.2.2.6.2	Tiempo TAU de secado para T6.....	121
4.2.2.6.3	Velocidad de secado para T6.....	122
4.2.2.7	Tratamiento T7 (A3B1)	123
4.2.2.7.1	Curva de secado T7.....	124
4.2.2.7.2	Tiempo TAU para T7	125
4.2.2.7.3	Velocidad de secado T7.....	126

4.2.2.8	Tratamiento T8 (A3B2)	127
4.2.2.8.1	Curva de secado T8.....	128
4.2.2.8.2	Tiempo TAU para T8	129
4.2.2.8.3	Velocidad de secado T8.....	130
4.2.2.9	Tratamiento T9 (A3B3)	131
4.2.2.9.1	Curva de secado T9.....	132
4.2.2.9.2	Tiempo TAU para T9	133
4.2.2.9.3	Velocidad de secado T9	134
4.2.3	Tiempo global de secado.....	135
4.2.4	Actividad de agua.....	137
4.3	SECADO PULSANTE.....	138
4.4	CONTENIDO DE HUMEDAD EN EL PRODUCTO FINAL	139
4.5	HOMOGENEIDAD DEL CONTENIDO DE HUMEDAD EN LOS GRANOS.....	142
CAPÍTULO V.....		144
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		144
4.6	CONCLUSIONES.....	144
4.7	RECOMENDACIONES	145
CAPÍTULO VI.....		146
BIBLIOGRAFÍA.....		146
CAPÍTULO VII.....		150
ANEXOS		150

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: El Café	5
Figura 2: Composición de un fruto de café	7
Figura 3: Localización geográfica de las principales zonas cafetaleras y variedades cultivadas en Ecuador	10
Figura 4: Café Arábigo.....	11
Figura 5: Café Robusta.....	12
Figura 6: Secado del café. Método seco o natural	14
Figura 7: Beneficio húmedo.....	14
Figura 8: Esquema de un secador de horno	18
Figura 9: Secador de bandejas.....	19
Figura 10: Secadores de lecho fluidizado	19
Figura 11: Proceso básico de secado.....	21
Figura 12: Periodos de secado	23
Figura 13: Periodo de velocidad de secado constante.....	24
Figura 14: Periodos de velocidad decreciente.....	25
Figura 15: Mecanismos de transporte de humedad.....	26
Figura 16: Mecanismos de difusión superficial en el transporte de agua	28
Figura 17: Tabla psicrométrica	29
Figura 18: Tipos de contenidos de humedad.....	33
Figura 19: Curva de velocidad de secado típica, condición de secado constante. .	34
Figura 20: Actividad de agua versus contenido de humedad para diferentes tipos de alimentos	38
Figura 21: Fases del lecho al aumentar la velocidad del gas	40
Figura 22: Esquema de secaderos de lecho fluidizado.....	41
Figura 23: FBD- Convencional- En lotes	42
Figura 24: FBD- Convencional-Bien mezclado y Continuo.....	43
Figura 25: FBD- Convencional- Semi-continuo	44
Figura 26: FBD- Convencional- Flujo de enchufe.....	44
Figura 27: Perfil de humedad en un secador de lecho fluidizado	45
Figura 28: Perfiles de humedad en el secador a diferentes temperaturas	46

Figura 29: Curva de velocidad de secado en lecho fluidizado.....	47
Figura 30: Cinética de secado (razón de humedad en función del tiempo)	48
Figura 31: Posibles cambios en la estructura de un alimento debidos al secado ...	55
Figura 32: Anomalías en un lecho fluidizado	59
Figura 33: Representación de Geldart.....	60
Figura 34: Dimensiones axiales para determinar la esfericidad (L: longitud mayor, W: ancho o longitud menor y T: altura).....	61
Figura 35: Picnómetro (botella de gravedad específica).....	65
Figura 36: Relación de velocidad del fluido vs caída de presión a lo largo del lecho	67
Figura 37: Esquema de la medición de la caída de presión	68
Figura 38: Caída de presión en el lecho en función de la velocidad del gas fluidizante.....	77
Figura 39: Diagrama del proceso de secado de café mediante lecho fluidizado. ..	84
Figura 40: Diagrama de proceso de secado de café en lecho fluidizado	85
Figura 42: Condiciones del aire de secado.....	150

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Calidad del café en frutos, café pergamino seco y en almendra.....	8
Tabla 2: Promedios de la composición química del grano de café	8
Tabla 3: Ubicación geográfica y condiciones ambientales	71
Tabla 4: Métodos de evaluación de la materia prima	75
Tabla 5: Descripción de los rangos de temperaturas (A) y velocidad de aire (B). 78	
Tabla 6: Análisis de Varianza	79
Tabla 7: tiempos de secado con y sin pulsaciones	80
Tabla 8: Resultados de las características físicas de la materia prima.....	89
Tabla 9: Porosidad de los granos de café	90
Tabla 10: Velocidad de arrastre	90
Tabla 11: Velocidad mínima de fluidización para el café.....	91
Tabla 12: Tiempo de secado del café expresado en TAU (min).....	93
Tabla 13: Resultados para el Análisis de Varianza de la variable tiempo de secado	94

Tabla 14: Prueba de Tukey para tratamientos.....	95
Tabla 15: Prueba DMS para el factor A (Temperatura) de la variable tiempo	95
Tabla 16: Prueba DMS para el factor B (velocidad del aire) de la variable tiempo.....	95
Tabla 17: Modelos más utilizados en los procesos de secado de granos.....	97
Tabla 18: Condiciones de secado T1	99
Tabla 19: Comportamiento de la humedad y velocidad de secado T1	99
Tabla 20: Condiciones de secado T2	103
Tabla 21: Comportamiento de la humedad y velocidad de secado T2	104
Tabla 22: Condiciones de secado T3	107
Tabla 23: Comportamiento de la humedad y velocidad de secado T3	108
Tabla 24: Condiciones de secado T4	111
Tabla 25: Comportamiento de humedad y velocidad de secado T4	112
Tabla 26 Condiciones de secado para T5.....	115
Tabla 27: Comportamiento de humedad y velocidad de secado T5	116
Tabla 28: Condiciones de secado T6	119
Tabla 29: Comportamiento de humedad y velocidad de secado T6	120
Tabla 30: Condiciones de secado T7	123
Tabla 31: Comportamiento de humedad y velocidad de secado T7	124
Tabla 32: Condiciones de secado T8	127
Tabla 33: Comportamiento de la humedad y velocidad de secado T8	128
Tabla 34: Condiciones de secado T9	131
Tabla 35: Comportamiento de humedad y velocidad de secado T9	132
Tabla 36: Valores de humedad final para cada tratamiento.....	139
Tabla 37: Análisis de varianza para la humedad final del grano	140
Tabla 38: prueba de tukey para tratamientos de la variable humedad final del grano.....	141
Tabla 39: Prueba DMS para factor A (temperatura) de la variable humedad final del grano.....	141
Tabla 40: Prueba DMS para el factor B (velocidad del aire) de la variable humedad final del grano.....	141
Tabla 41: Características del aire desecante.....	151
Tabla 42: Muestra 1 (base del lecho)	155

Tabla 43: Muestra 2 (mitad del lecho)	155
Tabla 44: Muestra 3 (superficie del lecho)	156

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Arrastre de las partículas según la velocidad del fluido	91
Gráfico 2: Velocidad mínima de fluidización	92
Gráfico 3: Tiempos de secado en TAU	93
Gráfico 4: Diagrama de pareto	96
Gráfico 5: Curva de secado T1	100
Gráfico 6: Curva de secado TAU para T1	101
Gráfico 7: Velocidad de secado T1	102
Gráfico 8: Curva de secado T2	104
Gráfico 9: Curva de secado TAU para T2	105
Gráfico 10: Velocidad de secado T2	106
Gráfico 11: Curva de secado T3	108
Gráfico 12: Curva de secado TAU para T3	109
Gráfico 13: Velocidad de secado T3	110
Gráfico 14: Curva de secado T4	112
Gráfico 15: Curva de secado TAU para T4	113
Gráfico 16: Velocidad de secado T4	114
Gráfico 17: Curva de secado T5	116
Gráfico 18: Curva de secado TAU para T5	117
Gráfico 19: Velocidad de secado T5	118
Gráfico 20: Curva de secado	120
Gráfico 21: Curva de secado TAU para T6	121
Gráfico 22: Velocidad de secado T6	122
Gráfico 23: Curva de secado T7	124
Gráfico 24: Curva de secado TAU para T7	125
Gráfico 25: Velocidad de secado T7	126
Gráfico 26: Curva de secado T8	128
Gráfico 27: Curva de secado TAU para T8	129
Gráfico 28: Velocidad de secado	130

Gráfico 29: Curva de secado para el tratamiento T9 (A3B3)	132
Gráfico 30: Curva de secado TAU para T9	133
Gráfico 31: Velocidad de secado	134
Gráfico 32: Tiempo global de secado del mejor tratamiento (50 °C – 5,5 m/s). El tiempo hasta llegar a 12 % de humedad nos da 240 min. Unas 4 horas de secado.	135
Gráfico 33: Diagrama de Pareto estandarizado para Tau.....	136
Gráfico 34: Trama principal de los efectos para TAU.....	137
Gráfico 35: Actividad de agua para cada tratamiento	137
Gráfico 36: Secado pulsante para el mejor tratamiento (50 °C – 5,5 m/s)	139
Gráfico 37: Contenido de humedad en el producto final	140
Gráfico 38: Uniformidad del contenido de humedad.....	143
Gráfico 39: Uniformidad en el contenido de humedad.....	143

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Determinación de humedad para el café	150
Anexo 2: Condiciones del aire de secado (Tabla psicrométrica).....	150
Anexo 3: Cálculo de la velocidad de secado.....	151
Anexo 4: Cálculo de la densidad.....	152
Anexo 5: Cálculo del diámetro medio del grano	152
Anexo 6: Cálculo de la porosidad	153
Anexo 7: Determinación del área de secado	153
Anexo 8: Uniformidad del contenido de humedad final.....	155
Anexo 9: Norma INEN 285: 2006	156
Anexo 10: Fotografías.....	159
Anexo 11: GLOSARIO DE SIMBOLOGÍA	161

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1: Equipo de fluidización.....	72
Fotografía 2: Café caturra	86
Fotografía 3: Recepción	86
Fotografía 4: Lavado	86
Fotografía 5: Selección	87

Fotografía 6: Pesado.....	87
Fotografía 7: Proceso de secado.....	87
Fotografía 8: Café seco	88

RESUMEN

El presente trabajo se desarrolló como parte del proyecto de investigación “Desaponificado y escarificado de la quinua *Chenopodium quinoa*” de donde se utilizó el equipo para la parte experimental en los laboratorios de Ingeniería Mecatrónica de Universidad Técnica del Norte, en la ciudad de Ibarra Ecuador. En esta investigación se secó el café arábigo en lecho fluidizado y se determinó su influencia en el tiempo de secado comparándolo con los métodos tradicionales. Se utilizó un reactor de 0,1 m de diámetro y se mantuvo una altura constante del lecho de granos de 0,1 m. El equipo experimental es controlado por un computador interno a través del Software LabVIEW. Se diseñó un experimento factorial 2^k donde los factores en estudio fueron la temperatura y velocidad del aire y la variable dependiente el tiempo de secado. Se realizó el procesamiento de los datos experimentales obtenidos de las curvas características del secado, donde el análisis estadístico determinó valores significativos tanto para la velocidad como para la temperatura del aire. Los resultados de este proceso determinó un tiempo de secado TAU mínimo de 50 minutos a valores bajos de temperatura de 50^0 C, siendo 10 veces menor el tiempo que los valores obtenidas en secadores de bandejas y aun superiores en los métodos tradicionales de secado al sol, con este tipo de secado fluidizado se logra evitar el sobre secado y garantizar un secado más homogéneo del café.

Palabras claves

Secado, café cereza, fluidización, MR, TAU

SUMMARY

This study refers to the drying of Arabica coffee by fluidized bed and its comparison with other traditional methodologies. A reactor of 0.1 m diameter was used and the height was kept constant and equals to the diameter. The experimental equipment is controlled by the Data Capture Unit of the National Instruments NI cDAQ-9139, which makes the interface between the reactor and the internal computer through Lab VIEW software. A two factorial experiment was designed where the independent variables were the temperature and the air speed and drying time as dependent variable. The processing of the experimental data depicted characteristic curves of the drying. The statistical processing shown significant values for both speed and air temperature. As final result of this process reductions of drying time of 50 minutes were achieved with low values of temperature such as 50⁰ C, being 10 times lower than the values obtained by the tray type dryers and even higher than the drying traditional methods such as intensive solar. On the other hand, mass loss by over-drying was avoided, guaranteeing a more homogeneous drying.

Keywords

Drying, coffee, fluidization, MR, TAU

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 PROBLEMA

En los países en vías de desarrollo los métodos disponibles para secar café son limitados, la mayoría de productores realizan el secado en tendales en planchas de hormigón, debido a la facilidad de construcción y operación, a excepción del café destinado a la exportación, donde el secado se realiza con aire caliente en secadores de bandejas y en secadores mixtos con radiación solar a convección natural. Asimismo, se realiza el secado con aire caliente en secadores tipo silo en dos o más compartimentos a convección forzada con tiempos entre 20 a 25 horas. La desventaja del secado Convectivo con aire caliente es la baja uniformidad de humedad del grano.

Otra de las dificultades que se presentan en el proceso, son las pérdidas de material por defectos, consecuencia de un mal secado donde se presentan granos quebrados, con manchas extrañas, mohosos, entre otros lo que origina un producto bajo en calidad organoléptica. Además, de la mayor mano de obra que se requiere para el movimiento constante de la capa para lograr un mejor secado del grano y llegar al porcentaje de humedad deseado (10-12) %.

La manera tradicional para secar los granos implica mayor tiempo si se lo hace en contacto con las condiciones ambientales donde la transferencia de calor no se da a cabo de manera adecuada, lo que nos lleva a tener en cuenta que la meta del secado es prolongar la vida útil del producto mediante la eliminación de agua, y

así evitar el deterioro del mismo por el desarrollo de mohos, invasión de plagas entre otros defectos que ocasionan que el producto no posea las características de calidad óptimas para su venta y su consumo.

En la zona de Imbabura y norte del país el café arábigo se ve limitado en cuanto a la producción de buen café en distintas variedades a nivel comercial. El café Caturra es el que ofrece mayor producción, sin embargo no se ha prestado debida atención a la investigación para aprovechar ese rendimiento como un producto terminado de calidad.

1.2 JUSTIFICACIÓN

El café es uno de los productos más importantes especialmente para los países en vías de desarrollo, su economía se basa principalmente en la agricultura, selvicultura y actividades primarias en general. El secado de productos forestales y agrícolas es de gran importancia como parte del proceso para obtener derivados de los mismos.

Dentro de lo que se refiere a los procesos de secado de café existen varios métodos que han sido utilizados durante mucho tiempo pero en la actualidad es posible utilizar la herramienta tecnológica que facilita las operaciones de ciertos procesos donde existen pérdidas y por ende disminuye los costos de producción, así como también las pérdidas organolépticas y físicas del grano.

El estudio se centra en el secado de café arábigo *Coffea arábica L.* de la variedad Caturra a nivel de laboratorio, dentro del resto de las variedades que comprende el café arábigo, ésta se destaca debido a sus cualidades de un buen café y su excelente calidad en taza, es por ello que se le ha dado su debida importancia además de ser la variedad que más está disponible en el sector norte del país.

En países desarrollados existen métodos más eficientes para el secado de granos, dentro de los cuales están las técnicas de la fluidización siendo una de las más

novedosas ideal para el secado y beneficiado de granos. Se propone emplear el método de secado por lecho fluidizado con el objetivo de reducir el tiempo de secado y las pérdidas de producto durante el proceso. Esta técnica de secado garantiza un producto con características físicas y organolépticas mejores en comparación al producto obtenido de un secado por métodos tradicionales y en lechos fijos.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar los parámetros operacionales del proceso de secado del café arábigo *Coffea arábica L.* de la variedad caturra, mediante lecho fluidizado.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar las propiedades físicas (tamaño, forma, color, uniformidad, humedad) y gasodinámicas (velocidad mínima de fluidización).
- Evaluar los parámetros de temperatura y velocidad del aire sobre el tiempo de secado.
- Aplicar pulsaciones en la velocidad del aire, a las condiciones de secado de los mejores tratamientos; para determinar su influencia sobre el tiempo de secado.
- Determinar las características fisicoquímicas del producto terminado: peso, humedad y actividad de agua.
- Evaluar la uniformidad del secado en el producto final.

1.4 HIPÓTESIS

Ho: El secado de café mediante lecho fluidizado permite acortar los tiempos de secado y se logra obtener un secado más homogéneo de los granos, respecto al secado obtenido mediante el proceso de secado natural tradicional.

Hi: El secado de café mediante lecho fluidizado no permite acortar los tiempos de secado y no se logra obtener un secado más homogéneo de los granos, respecto al secado obtenido mediante el proceso de secado natural tradicional.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 EL CAFÉ



Figura 1: El Café

Fuente: COFENAC

Hoy en día el café es considerado una de las bebidas más importantes en el mundo, siendo rivalizado solo por el té, la cocoa y el mate. El vocablo café viene del árabe Kahwah (cauá) que significa que es un arbusto que siempre permanece verde, el cual es originario de Etiopía. Existen algunas teorías acerca del descubrimiento del café sin embargo dos son las más conocidas; la primera afirma que el cafeto lo descubrió un pastor que fue a ver sus cabras las cuales se ponían nerviosas e intranquilas cuando comían el fruto de esta planta. La segunda manifiesta que fue descubierto por los monjes que lo utilizaban para inducirse el insomnio en sus horas de oración nocturna (Ponce, Dolores, & Mejia Coronel, 2002).

El fruto del café tiene la apariencia de una cereza pequeña de color verde, inicialmente, para luego volverse amarillo y posteriormente rojo carmesí cuando

alcanza la madurez; en su interior lleva dos semillas rodeadas de una pulpa amarillenta, que son los granos de café.

Las plantaciones de café se pueden cultivar durante 20-30 años, la variedad arábica se cultiva a una altura de 600-2000 msnm y a temperatura de 15-24° C, mientras que la variedad Robusta se cultiva a 200-900 msnm y a 24-29° C, por tal razón los cafés provenientes de las altiplanicies tropicales mejoran el aroma, ya que allí, el café crece y madura más despacio. La variedad más aceptada es la arábica debido a su agradable aroma, siendo la más cultivada en el país (Cornejo & Vinicio, 2012).

2.1.1 TAXONOMÍA

El café pertenece a la familia de las rubiáceas y al género *Coffea*. Existen numerosas especies de cafeto y diferentes variedades de cada especie. Las especies más importantes comercialmente pertenecientes al género *Coffea*, son conocidas como *Coffea arábica* Linneo (conocida como Arábica o Arábiga) y *Coffea canephora* (conocida como Robusta).

Cuadro 1: Taxonomía del café

Reino:	Plantae
División:	Magnoliophyta
Clase:	Dicotyledoneae
Subclase:	Asteridae
Orden:	Rubiales
Familia:	Rubiaceae
Género:	Coffea
Especie:	C. arábica
Nombre binomial:	Coffea arábica L.

Fuente: (Cornejo & Vinicio, 2012)

2.1.2 CARACTERÍSTICAS

Las especies de café pertenecientes a la familia *Rubiaceae* y al género *Coffea*, con mayor reconocimiento económico en el mundo son: *Coffea arábica* y *Coffea*

canephora, las cuales se conocen en el mercado como cafés arábicos y robustas, respectivamente. En general, el café de la especie *C. arábica* presenta aroma y acidez pronunciadas, mientras que el café *Robusta* se caracteriza por tener mayor cuerpo. Ambas especies se distinguen por sus características botánicas, genéticas, agronómicas, químicas y morfológicas. El 80 % de la producción mundial corresponde a la especie arábica el cual se cultiva principalmente en los países centroamericanos, Colombia, Brasil, en algunos países asiáticos como la India y del África como en Kenia y Etiopía (Puerta, 2013).

2.1.2.1 El fruto

Madura en 28 semanas después de la floración, con forma elíptica y con 1,5 cm de largo, está formado por epicarpio o piel, mesocarpio o pulpa, endocarpio o pergamino y dos semillas. Botánicamente es una cereza; en el interior de cada cereza hay dos semillas separadas por un surco y rodeadas de pulpa amarilla, estos son granos de café, protegidos a su vez por una película plateada y sobre ésta, un tegumento fino amarillo o pergamino (Cornejo & Vinicio, 2012).

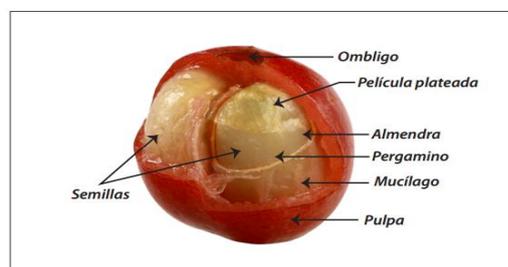


Figura 2: Composición de un fruto de café
Fuente: (Ramos, Sanz, & Oliveros, 2014)

Las constantes físicas del café son las relaciones físicas existentes entre el peso y el volumen, el contenido de humedad y otras características del fruto del café, teniendo en cuenta los diferentes estados en que se puede transformar el producto desde cereza madura hasta café almendra. Las constantes físicas son un instrumento útil para evaluar el sistema productivo, facilitan las operaciones comerciales y el diseño y calibración de los diferentes dispositivos y máquinas empleadas en el proceso de beneficio del café (Montilla et al., 2013).

Tabla 1: Calidad del café en frutos, café pergamino seco y en almendra

	Café seleccionado	Café sin seleccionar
Calidad de la masa recién cosechada (%)		
Frutos verdes	0	9,45
Frutos sobremaduros	0	6,13
Frutos secos	0	4,48
Frutos perforados por broca	0	6,04
Calidad de la masa en pergamino (%)		
Grano guayaba	0,85	2,67
Grano pelado	0,33	0,76
impurezas	0,39	0,83
Calidad de la masa en almendra (%)		
Total defectos (pasillas)	5,41	9,12

2.1.2.2 Contenido nutricional del café

El café, químicamente se compone de agua y materia seca. La materia seca de los granos del café almendra está constituida por minerales y por sustancias orgánicas que son los carbohidratos, lípidos, proteínas, alcaloides, como la cafeína y la trigonellina, así como, por ácidos carboxílicos y fenólicos, y por compuestos volátiles que dan el aroma a la almendra.

La especie, la madurez, la fermentación, el secado, el almacenamiento, la tostación y el método de preparación de la bebida influyen en la composición química y en la calidad del sabor, acidez, cuerpo, amargo, dulzor y aromas de una taza de café.

Tabla 2: Promedios de la composición química del grano de café

Composición química	Arábica (%)	Robusta (%)
Polisacáridos	50,8	56,40
Sacarosa	8,00	4,00
Azúcares reductores	0,10	0,40
Proteínas	9,80	9,50
Aminoácidos	0,50	0,80
Cafeína	1,20	2,20
Trigonelina	1,00	0,70
Lípidos	16,20	10,00
Ácidos alifáticos	1,10	1,20
Ácidos clorogénicos	6,90	10,40
Minerales	4,20	4,40
Compuestos aromáticos	trazas	trazas

Fuente: (Puerta, 2011).

Los granos de café almendra de las variedades de *Coffea arábica L.* contienen una mayor cantidad de lípidos y sacarosa que *Coffea canephora* (robusta), mientras

que en la composición de Robusta se destaca el mayor contenido de polisacáridos, cafeína, ácidos clorogénicos y cenizas (Puerta, 2011).

2.1.2.3 Humedad del café

El contenido de humedad de la cereza del café está entre el 50 y el 75 por ciento del peso total, dependiendo del tipo de fruto y sus condiciones. Las cerezas ya secas, bolas o capulines contienen de 15 a 25 por ciento de humedad.

Para que el grano de café pueda ser embodegado, y posteriormente comercializado, se recomienda una humedad de alrededor del 12%. Podemos afirmar que el principal factor que influye en la calidad del café almacenado es la humedad. Los granos húmedos constituyen un medio ideal para el desarrollo de microorganismos e insectos que dañan al producto y deterioran su aspecto (Berrueta et al., 2003).

2.2 CAFICULTURA EN EL ECUADOR

En el Ecuador prevalecen los cafetales de edad avanzada con deficiente manejo agronómico y de baja producción, situación que es agravada por la presencia de plagas y enfermedades, errores que han provocado que el Ecuador no sea considerado como un productor de café de alta calidad.

En el Ecuador se utiliza una superficie de 219 mil hectáreas para siembra de café (2008). Con una producción de 1.10 millones de sacos de 60 kg, la mayoría de estas pertenecen a la variedad arábica 72% y 28% de variedad robusta (Cornejo & Vinicio, 2012).

2.2.1 ZONAS GEOGRÁFICAS DE PRODUCCIÓN DE CAFÉ EN EL ECUADOR



Figura 3: Localización geográfica de las principales zonas cafetaleras y variedades cultivadas en Ecuador

Fuente: Corporación ecuatoriana de cafetaleros, 2010 "Mapa interactivo"

Según los datos de la Asociación Nacional de Exportadores de café, ANECAFE estima que en la región costa se concentra la mayor parte de cultivos de café, se siembra aproximadamente 112 000 hectáreas, en la sierra 62 000 hectáreas, en la región amazónica 55 000 hectáreas y en Galápagos 1 000 hectáreas de cafetales. Esta amplia distribución se presenta debido a que Ecuador es un país que tiene producción mixta, es decir, cultiva las dos especies comerciales arábica (*Coffea arábica L.*) y robusta (*Coffea canephora*) (Cornejo & Vinicio, 2012).

2.2.2 VARIEDADES

Dentro de las especies *Coffea* más importantes son la variedad arábica *Coffea arábica L.* y robusta *Coffea canephora*, variedades que se encuentran en mayor proporción en el país.

2.2.2.1 Café arábigo

El Café arábigo *Coffea arabica* L. presenta una forma de arbusto que crece unos 12 m. de altura en estado natural, de copa piramidal, hojas elípticas, oblongas y a veces lanceoladas. El arbusto de café arábigo es precedente de la Península de Arábica, Etiopia, en donde crece en estado silvestre entre los 1 000 y 2 000 m. de altitud. En la actualidad se puede controlarlo cultivándolo en numerosas regiones tropicales y subtropicales del mundo (Medina Micolta & Luna Merchán, 2013).

Las variedades que se cultivan en Ecuador dentro de la variedad arábica son Nacional o Typica, Caturra y Bourbon, difundándose en los últimos años las nuevas variedades arábicas de Pacas, Catuai y Catimor que son cultivadas en menor proporción.



Figura 4: Café Arábigo

Fuente: COFENAC

2.2.2.2 Café Robusta

Es un árbol que crece unos 10 m de altura, es una especie más fácil de cultivar que el arábigo puesto que resiste mejor las enfermedades, en especial la roya del café. Crece en las zonas menos elevadas cultivándose desde el nivel del mar hasta los 700 metros de altitud. El café robusta procede de África occidental, aunque se cultiva en muchas zonas tropicales del mundo (Medina Micolta & Luna Merchán, 2013).

Produce semillas más ovaladas de las que se obtiene un café con contenido más elevado de cafeína del 2 al 4% con un sabor más amargo, se lo utiliza principalmente para variedades tipo soluble o para mezcla con el arábigo.



Figura 5: Café Robusta

Fuente: COFENAC

2.2.3 IMPORTANCIA ECONÓMICA Y AMBIENTAL DE LA PRODUCCIÓN DE CAFÉ EN EL ECUADOR

- Genera empleo directo a 105 000 familias de productores
- Es una fuente de trabajo para varios miles de familias vinculadas a las actividades de comercio, agroindustria artesanal, industria de café soluble, transporte y exportación.
- Los cafetales en su mayor parte, están cultivados bajo arboles de alto valor ecológico y económico, en diversos arreglos agroforestales, que constituyen un hábitat apropiado para muchas especies de la fauna y flora nativas.
- Contribuyen a la captura de carbono de manera similar a los bosques secundarios.
- Regulan el balance hídrico de los ecosistemas.
- En el manejo tecnificado no requieren de una dependencia de agroquímicos.

2.2.4 MÉTODO BÁSICO DE SECADO DE CAFÉ

Después de la cosecha del cafeto, el siguiente paso es remover las semillas de café de la fruta madura y secarlas. Este procedimiento se puede realizar a través de dos métodos de recolección: el seco y el húmedo.

2.2.4.1 Método de beneficiado en seco

El método de recolección en seco o “natural” consiste en secar la cereza o drupa completamente. Es el método más antiguo y más simple, y requiere además de poca maquinaria. Las cerezas cosechadas se ordenan y se limpian a mano, con la intención de eliminar las cerezas verdes, podridas y dañadas, así como también cualquier tipo de suciedad, tierra, hojas y ramas.

Otra forma de realizar este procedimiento es hacer flotar las cerezas en el agua. El siguiente paso es extender las cerezas de café bajo el sol, ya sea en grandes patios de concreto o de ladrillo, o en esteras puestas sobre unos caballetes a la altura de la cintura humana. Cada vez que llueve se cubren las cerezas. Durante el proceso de secado, estas se inclinan o se giran a mano para garantizar un secado uniforme. El tiempo aproximado para que las cerezas se sequen lo suficiente es de 4 semanas. En las grandes plantaciones, la máquina de secado se utiliza a veces para acelerar este proceso, después que el café es pre secado al sol durante pocos días.

Las cerezas secas son frágiles, con una cáscara exterior dura, además deberían tener un contenido máximo de humedad del 12.5%. Estas se almacenan en silos hasta que se envían a la fábrica para la trilla, donde se eliminan las 2 capas exteriores de las cerezas secas. Las semillas del café verde se ordenan y clasifican antes de estar listas para la venta (Olivo Peñaranda & Silva Cueva, 2009).



Figura 6: Secado del café. Método seco o natural

Fuente: (Olivo Peñaranda & Silva Cueva, 2009)

2.2.4.2 Método de beneficiado en húmedo

Este método consiste en despulpar las cerezas de café, inmediatamente después de la cosecha y dejar fermentar naturalmente los granos durante 48 horas; terminado el fermentado se realiza un lavado con abundante agua para limpiar los granos de café y se procede a secarlos de igual manera en patios o zarandas durante aproximadamente 48 horas.

El tiempo de secado al sol depende de las condiciones climáticas de la región, del espesor de la capa de café y de la frecuencia con la que se remueva el grano, lo que requiere de entre 40-50 horas de secado. Se debe evitar las mezclas de café totalmente seco con café que no se ha secado completamente ya que el café con falta de secado toma olores desagradables y son atacados por hongos afectando la calidad de todo el producto final (Montilla et al., 2013).

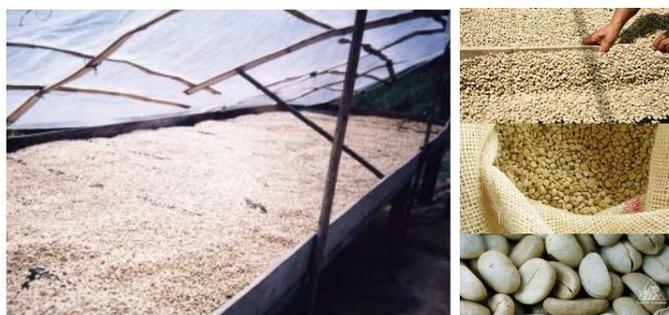


Figura 7: Beneficio húmedo

Fuente: (Olivo Peñaranda & Silva Cueva, 2009)

Tradicionalmente el secado de café se lo hace en tendales o patios de cemento, entablillados de madera, zarandas de plástico o malla metálica y en marquesinas. El secado al sol permite lograr una mejor calidad, si los granos no se rehumedecen durante el secamiento; por eso es conveniente cubrir el café con lonas inmediatamente en caso de lluvia. Este secado se debe efectuar lo más uniforme posible; para ello deben esparcirse los granos en capas de 3-5 centímetros de espesor, removiendo 3-4 veces al día para acelerar y emparejar el grado de secado.

La cosecha del grano se realiza en el momento en que este alcanza la madurez fisiológica, es decir cuando la humedad es superior a la adecuada para la conservación (55-70%), en este ambiente el producto tiene efectos como el calentamiento y deterioro, una semilla con un contenido de agua bajo se encuentra en óptimas condiciones para almacenarse por el mayor tiempo posible, por lo que el secado es indispensable (Jaramillo Calle & Narváez Quiranza, 2012).

Los rendimientos y la composición química del grano seco pueden verse afectados por factores como la especie, la variedad, la naturaleza y la fertilidad del suelo, las condiciones atmosféricas y ambientales, el manejo agronómico, la edad de la plantación, plagas y enfermedades y el control de las mismas. El periodo de cosecha, el contenido de humedad y la recolección influyen en los rendimientos y las características del grano, sin embargo, un café cultivado de manera correcta puede perder sus cualidades al aplicar un inadecuado proceso de beneficio (Montilla et al., 2013).

2.2.4.3 Secado de café en lecho fluidizado

El secado de café en lecho fluidizado ha sido estudiado desde hace muchos años atrás sin embargo cualquier avance científico que tenga relación con la fluidización sigue siendo novedoso ya que este método comprende una complejidad de parámetros que pueden influir de manera muy versátil en cuanto a los objetivos planteados, particularmente, para cada investigación.

Los métodos de secado innovadores como la intermitencia térmica y sistemas de flujo pulsado aplicados en productos agrícolas están siendo introducidos, con el propósito de incrementar la capacidad de evaporación y la eficiencia energética de las instalaciones (Velásquez, Rodríguez, & Castaño, 2011).

2.3 PROCESO BÁSICO DE SECADO DE ALIMENTOS

Se definirá en términos de alimentos. Es el proceso que consiste en la eliminación de agua (humedad), contenida en los alimentos por medios físicos hasta que el nivel de agua sea adecuado para su conservación por largos periodos.

El nivel de agua deseado lo determina el tipo de producto. Por ejemplo el secado de granos y cereales se realiza hasta obtener un aproximado de 12% de humedad en el producto, esta humedad es parecida a la del aire, es decir al equilibrio de humedad con el entorno (Valdez, 2008).

Una de las primeras operaciones posteriores a la cosecha, destinadas a mantener la calidad de los productos agrícolas es el proceso de secado el cual consiste en la eliminación parcial del agua libre contenida en estos productos hasta que llegan a un contenido de agua que permite el almacenamiento por mucho tiempo, sin que ocurra el deterioro de los productos.(Aspurz Tabar, 2011).

2.3.1 MÉTODOS GENERALES DE SECADO

Los métodos y procesos de secado se clasifican de diferentes maneras, sin embargo los más principales son

- **En lotes**, cuando el material a secarse se introduce en el equipo y se verifica el proceso en periodos de tiempo.

- **Continuos**, cuando se introduce el material a secar sin interrupción y al final del proceso se obtiene un producto seco.

Según Calle (2010), en la industria ecuatoriana existen problemas en cuanto a la conservación apropiada de algunos granos como maíz, trigo y arroz.

2.3.2 TIPOS DE SECADORES DE ALIMENTOS

La conservación apropiada de algunos granos presenta un gran problema en la industria alimentaria del Ecuador. Para la selección adecuada del método de secado de cada producto se toma en cuenta factores económicos, medio ambientales, etc., que garantizan el correcto almacenamiento y posterior procesamiento al mantener integras las propiedades alimenticias y su estructura física. (Jaramillo Calle & Narváez Quiranza, 2012)

Los secadores según la forma de transmitir calor a los granos húmedos se clasifican en:

- Secadores Directos
- Secadores Indirectos
- secadores Dieléctricos
- secadores por Radiación

2.3.2.1 Secadores de calentamiento Directo

Su característica principal es la utilización de gases que entran en contacto físico con los granos húmedos, transmiten calor por convección y arrastran fuera del secador los vapores producidos. Se emplean en la industria agrícola y constan de un sistema de calefacción e impulsión de aire.

Existen varios secadores de calentamiento directo sin embargo los más utilizados en el país están los secadores de estufa y los de bandejas.

Estufa

Es el más simple y consta de un espacio en forma de un paralelepípedo que contiene dos plantas. El aire de secado suministrado por un ventilador se calienta en el primer piso y atraviesa por convección natural o forzada al segundo, donde se aloja el grano. Su uso es muy reducido en la industria.

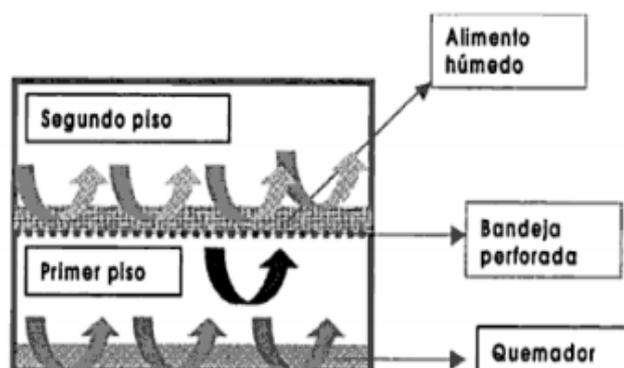


Figura 8: Esquema de un secador de horno

Fuente:(Jaramillo Calle & Narváez Quiranza, 2012)

Cámara de bandejas o de armario

Está formado por un cubículo metálico rectangular, contiene soportes móviles los cuales sostienen a los bastidores encargados de llevar un cierto número de bandejas una sobre otra, distanciadas a cierta medida donde se coloca el grano.

El aire caliente que circula entre las bandejas tiene una distribución uniforme por medio de una serie de tabiques y es impulsado por un ventilador. Estos secadores son útiles para pequeñas cargas de granos un poco frágiles. Su operación resulta costosa debido a la mano de obra requerida para la carga y descarga, sin embargo el producto es de mejor calidad que los obtenidos de otros secadores. (Jaramillo Calle & Narváez Quiranza, 2012)

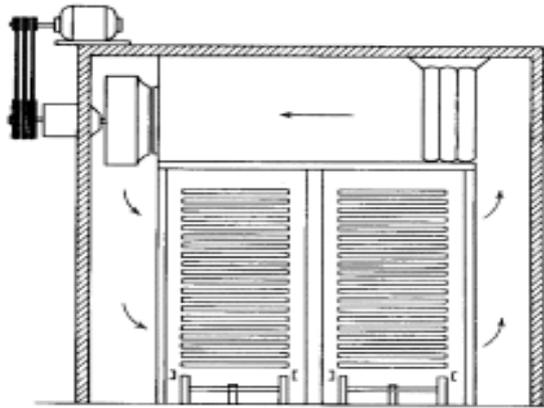


Figura 9: Secador de bandejas

Secadores de lecho fluidizado

Este tipo de secadores trabajan de forma continua o por lotes, utiliza aire o gas como agente de secado y de fluidización. El producto se mantiene elevado por tanto se consigue que la superficie efectiva de contacto entre el sólido y el aire sea muy grande; a su vez el grano está sometido a una acción de mezcla muy intensa, al utilizar aire caliente el tiempo de secado es más corto, debido al alto índice de transferencia de calor.(Jaramillo Calle & Narváz Quiranza, 2012))

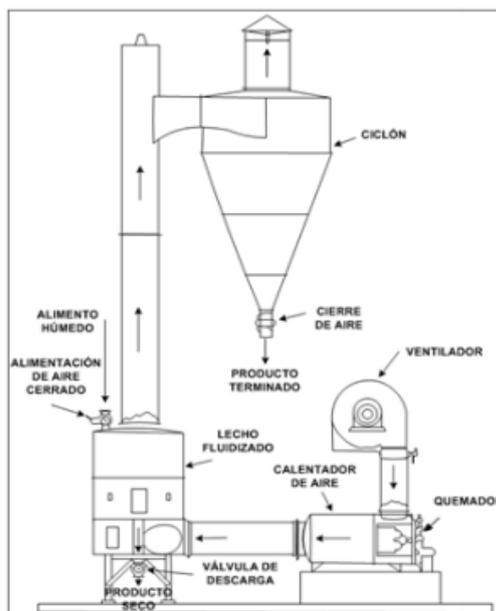


Figura 10: Secadores de lecho fluidizado

2.3.2.2 Secadores de calentamiento Indirecto

En este tipo de secadores la transmisión de calor hacia los granos se da por conducción, es decir, a través de una pared que por lo general es metálica.

Las principales fuentes de calor son:

- Vapor que condensa
- Agua caliente
- Aceites térmicos
- Gases de combustión
- Resistencias eléctricas

Estos tipos de secadores son muy útiles para el secado a presiones reducidas y en atmosferas inertes, por lo que se recomienda utilizar en productos que generen turbulencia, polvos y que sean de fácil oxidación ya que no existe contacto en ningún momento con agentes externos. (Jaramillo Calle & Narváez Quiranza, 2012)

2.3.3 SECADO CONVECTIVO

Como se ha indicado anteriormente, el calor puede suministrarse por convección (secadores directos), por secado (secado por contacto o por secado indirecto), radiación o volumetría colocando el material húmedo en un campo electromagnético de microondas o de radiofrecuencia. Más del 85% de los secadores industriales son de tipo Convectivo con aire caliente o gases de combustión directa como medio de secado. Más del 99 por ciento de las aplicaciones en el secado de alimentos implica la eliminación de agua. (Sachin, Chung, & Arun, 2010)

Una de las primeras operaciones posteriores a la cosecha destinadas a mantener la calidad de los productos agrícolas, es el proceso de secado el cual consiste en la remoción parcial del agua libre contenida en estos productos hasta que llega a un

contenido de agua que permite el almacenamiento por mucho tiempo, sin que ocurra el deterioro de los productos. (Aspurz Tabar, 2011)

El secado por aire caliente es considerado un proceso simultáneo de transferencia de calor y masa, donde el agua se transfiere por difusión, capilaridad y convección, de acuerdo con los gradientes de humedad y temperatura entre el alimento y el aire de secado respectivamente, desde el interior del alimento a la interfase aire-alimento y desde ésta a la corriente de aire por convección. (Tovilla Moralesa & Sandoval Torres, 2015)

El calor se transfiere al alimento mediante una corriente de aire caliente, que además de transmitir el calor necesario para la evaporación del agua, es el agente transportador del vapor de agua que se elimina del alimento. (Contreras, 2006)

2.3.3.1 Transferencia de calor y masa

Es importante tener en cuenta que el mecanismo del movimiento del agua y consecuentemente la velocidad de este movimiento varía notoriamente con la estructura del sólido. (Flores & de Jesús, 2011)

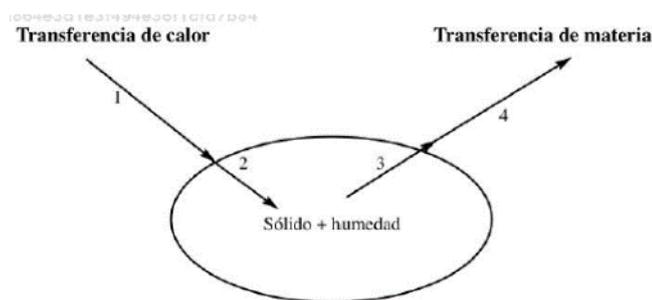


Figura 11: Proceso básico de secado

Fuente: (Casp Vanaclocha, 2008)

- **Transmisión de calor desde el gas hasta la superficie del producto.** Puede realizarse por conducción, convección o radiación.

- ***Transmisión de calor desde la interfase sólido-gas hasta el interior del sólido.*** Solo puede tener lugar por conducción, en régimen no estacionario (las condiciones en cualquier punto varían con el tiempo).
- ***Transmisión de materia a través del sólido.*** Se puede producir por difusión o por capilaridad. Difusión debida a las diferencias de concentración y capilaridad, aprovechando los capilares existentes. La difusión tiene lugar en el secado de productos con humedades del orden de 25% (base húmeda) o inferiores, mientras que la capilaridad se presenta para humedades altas (65% o más), siempre que existan capilares en el interior (Casp Vanaclocha, 2008).
- ***Transferencia de vapor desde la interfase sólido-gas hacia el seno del gas.*** Los equipos de deshidratación utilizarán por tanto para la transferencia de energía, procesos basados en la convección, conducción o radiación desde la fuente de calor hasta el alimento. Los sistemas más usuales emplean la convección como mecanismo de transferencia de calor y aire como vehículo de esta energía, por tanto la transferencia de calor dependerá, en este caso, de la temperatura del aire, de su humedad, de su caudal, de la superficie expuesta del alimento y de la presión.

2.3.3.2 Periodos de secado

Al secar un sólido húmedo mediante un gas con temperatura y humedad fijas, aparece siempre un patrón general de comportamiento. Inmediatamente después del contacto entre la muestra y el aire de secado, la temperatura del sólido se ajusta hasta que alcanza un estado estable. La temperatura del sólido y la proporción de secado pueden aumentar o disminuir hasta alcanzar la condición de estado estable. (Flores & de Jesús, 2011)

Durante el proceso de secado de un sólido, se puede ir obteniendo datos experimentales que relacionan el contenido de humedad en base seca (X_s) con el tiempo (Θ).

El proceso de secado esta normalmente dividido en tres fases:

- Fase inicial de precalentamiento
- Velocidad de secado constante
- Una o más fases de velocidad de secado decreciente

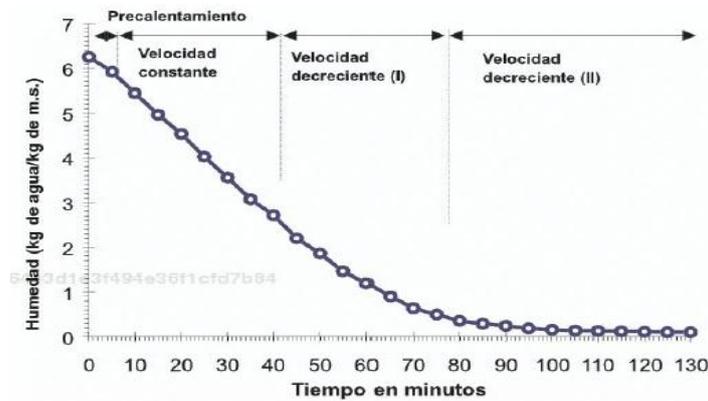


Figura 12: Periodos de secado

Fuente: (Casp, 2010). *Contenido humedad en función del tiempo*

Precalentamiento. El producto y el agua se calientan ligeramente hasta alcanzar la temperatura de bulbo húmedo o del agente secante. El producto cuando esta frio mantiene una presión baja por lo tanto la velocidad de transferencia de masa es lenta. Por el contrario, el gradiente de temperatura entre el aire caliente y la superficie fría del producto es elevado, en consecuencia la transferencia de calor es alta.

Velocidad constante de secado. La vaporización empieza cuando el contenido de agua del producto llega a la superficie. La transición de la humedad promedio alcanza su valor crítico, es decir que todo el vapor del material se disipa. (Jaramillo Calle & Narváez Quiranza, 2012).

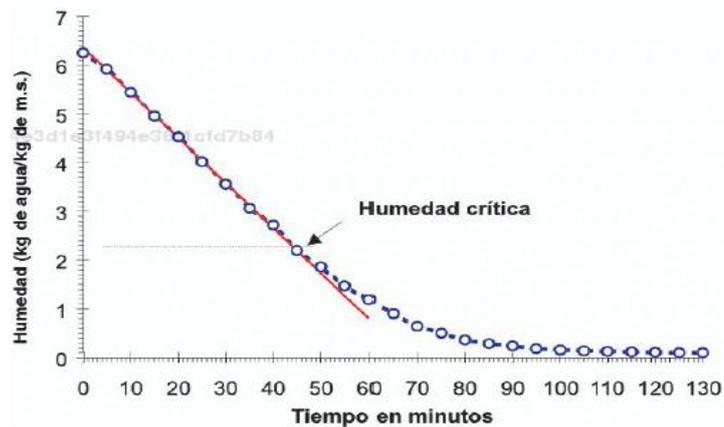


Figura 13: Periodo de velocidad de secado constante

Fuente: (Casp, 2010)

Velocidad decreciente de secado. Si la salida de humedad en el producto es lenta la velocidad de secado disminuye, hasta que el contenido de agua llegue a un punto de equilibrio con el aire de vaporización (Jaramillo Calle & Narváez Quiranza, 2012).

Este periodo existe solo para los materiales higroscópicos. El flujo másico se reduce más rápidamente que en el periodo anterior. En este periodo el conjunto del producto está en el dominio de la higroscopia. En el alimento no queda más que el agua ligada que se evacua muy lentamente (difusión-sorción). Esta fase se termina cuando el producto alcanza su humedad de equilibrio, que depende, como es lógico, de las condiciones de secado.

Los periodos de velocidad decreciente se aprecian en la siguiente gráfica donde se representa la velocidad de secado (dx/dt : variación de la humedad con respecto del tiempo) versus la humedad por encima del equilibrio.

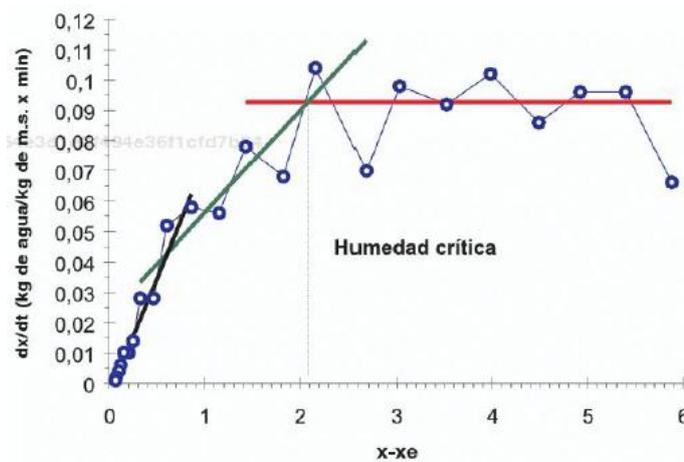


Figura 14: Periodos de velocidad decreciente

Fuente: (Casp Vanaclocha, 2008)

Los datos que se generan en el proceso de secado se expresan normalmente como el peso total de material húmedo como una función del tiempo durante el proceso de secado, aunque en ocasiones pueden expresarse en términos de velocidad de secado. El contenido de humedad del producto se define como la relación entre la cantidad de agua en el alimento y la cantidad de sólidos secos, y se expresa como (Ibarz & Barbosa Cánovas, 2014):

$$X = \frac{P_i - S}{S} \quad (1)$$

En la que P_i es el peso total de material en un tiempo determinado, siendo S el peso de sólido seco, XBS , la humedad expresada como peso de agua/ peso solido seco.

$$X = XBS - X^* \quad (2)$$

En la que X^* es el contenido de humedad cuando se alcanza el equilibrio, una típica curva de secado se obtiene al representar el contenido de humedad libre frente al tiempo de secado. Por lo tanto, la velocidad de secado, R , se puede

expresar de manera proporcional al cambio del contenido de humedad con el tiempo:

$$R \propto \frac{dX}{dt} \quad (3)$$

A partir de la curva de secado se obtiene el valor dX/dt para cada punto, mediante el valor que adquiere la tangente a la misma. La velocidad de secado R se puede expresar como:

$$R = -\frac{S'}{A} \frac{dX}{dt} \quad (4)$$

S' Cantidad de sólidos secos y A , área de la superficie que está secando.
(Gearkoplis, 1998)

2.3.4 MECANISMOS DE DESHIDRATACIÓN

En un proceso de secado el contenido de agua en un alimento se lo elimina básicamente mediante tres etapas o procesos:

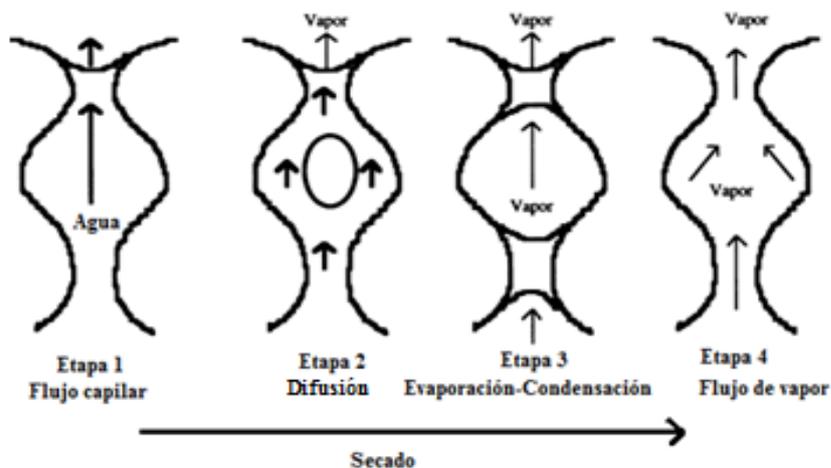


Figura 15: Mecanismos de transporte de humedad

Fuente: (Ibarz & Barbosa Cánovas, 2014)

2.3.4.1 Capilaridad

En cuanto a los tejidos de ciertos productos a secar existen conductos llamados capilares los cuales permiten la eliminación de agua. La capilaridad se refiere al flujo de un líquido a través de intersticios y sobre la superficie de un sólido, debido a atracciones, moleculares entre el líquido y el sólido. El agua que está sujeta dentro del intersticio, ya sea como líquido cubriendo la superficie o como agua libre en las cavidades celulares, está disponible a movimientos por capilaridad y gravedad, presentándose en forma de canales para un flujo continuo. (Scribd, 2016)

El flujo de un líquido a través de los intersticios y superficie de un sólido debido a la acción molecular entre el líquido y el sólido se denomina capilaridad. El flujo capilar ha sido aceptado como uno de los principales mecanismos de secado.

2.3.4.2 Difusión

El mecanismo principal de flujo en el secado de un sólido es la difusión. La difusión tiene lugar dentro de la estructura fina del sólido y dentro de los capilares y pequeños poros vacíos llenos de vapor. Este vapor se difunde hacia afuera hasta que, en el extremo abierto de un capilar, es arrastrado por el aire. Desafortunadamente el vapor no toma en cuenta las isothermas de retracción, endurecimiento de cajas o absorción. La difusión del líquido sucede, si el sólido húmedo se encuentra a una temperatura por debajo del punto de ebullición del líquido, mientras que la difusión de vapor sucede, si el líquido se vaporiza del material. (Sachin, Chung, & Arun, 2010)

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{eff} \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} \quad (5)$$

Donde X es el contenido de humedad libre, t es el tiempo, x es la dimensión espacial y D_{eff} es el coeficiente de difusión.

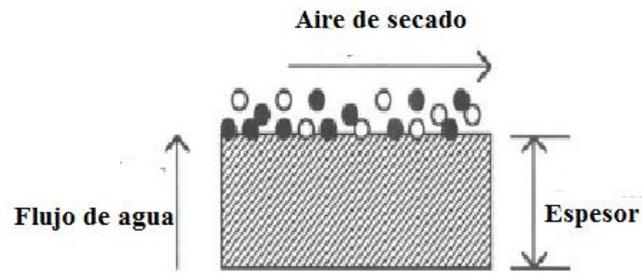


Figura 16: Mecanismos de difusión superficial en el transporte de agua

Fuente: (Sachin, Chung, & Arun, 2010)

2.3.4.3 Vaporización- Condensación

El vapor de agua dentro del producto es condensado cerca de la superficie. Esto asume que la tasa de condensación es igual a la tasa de evaporación en la superficie del producto y no permite la acumulación de agua en los poros cercanos a la superficie, tal como se indica en la figura 15. Esta teoría toma en cuenta la difusión simultánea de calor y masa, que supone que los poros son una red continua de espacios en el sólido.

2.3.5 PSICROMETRÍA EN EL SECADO

En cualquier proceso de secado, suponiendo un suministro adecuado de calor, la temperatura y la velocidad a las cuales se produce la vaporización del líquido dependen de la concentración de vapor en la atmosfera circundante.

En casi todas las operaciones de secado, el agua es el líquido evaporado y el aire es el gas de purga que se emplea comúnmente. Para fines de secado se utiliza un diagrama psicrométrico. Es un diagrama que muestra las características de humedad del aire, estas curvas son representaciones graficas de la relación entre temperatura y humedad del vapor de agua en el aire a presión constante.

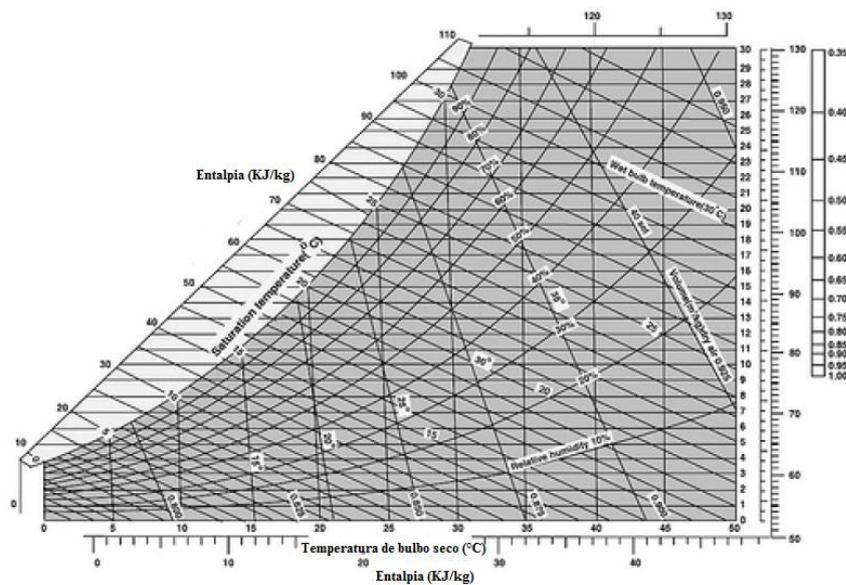


Figura 17: Tabla psicrométrica

Fuente: (Sachin, Chung, & Arun, 2010)

“la psicrometría es la ciencia que estudia las propiedades de la mezcla aire-vapor, prestando atención especial a todo lo relacionado con las necesidades ambientales, humanas o tecnológicas” (Díaz, 2011)

2.3.5.1 Propiedades de la mezcla aire- vapor de agua

El aire seco actúa como una esponja, absorbe humedad y en mayor cantidad cuando actúa caliente que cuando esta frio. El aire húmedo tiene cinco características variables que definen sus propiedades. (Casp Vanaclocha, 2008)

- **Temperatura de bulbo seco (TBS):** Temperatura de bulbo seco es la temperatura del aire indicada por un termómetro común. Se da en el eje horizontal del diagrama psicrométrico.
- **Temperatura de bulbo húmedo (TBH):** Es la que se alcanza cuando el bulbo de un termómetro de mercurio cubierto con un paño húmedo se expone a una corriente de aire sin saturar que fluye a elevadas velocidades (alrededor de 5 m/s). O también, el termómetro con el bulbo cubierto con

el paño húmedo puede moverse en el seno del aire sin saturar. Cuando el paño se expone al aire sin saturar, parte del agua se evapora debido a que la presión de vapor del paño húmedo saturado es mayor que la del aire sin saturar. (R. P. Singh & Heldman, 2009)

- **Temperatura de rocío (TR):** Temperatura de rocío es la temperatura a la que una muestra de aire húmedo en las mismas condiciones de presión alcanza la saturación de vapor de agua. En este punto de saturación, el vapor de agua comenzaría a condensarse en agua líquida o (si estuviera por debajo del punto de congelación) en escarcha, al continuar quitando calor. (Ocon García & Tojo Barreiro, 1980)

$$Pr = \sqrt{\frac{H}{100}} x [112 + (0.9xT)] + (0.1xT) - 112 \quad (6)$$

- **Humedad relativa (HR):** Es la relación entre la presión de vapor de agua del aire y la presión de vapor del aire saturado a la temperatura en base seca.

$$HR = \frac{dv}{ds} x 100 \quad (7)$$

Donde dv es la densidad del vapor de agua en el aire (kg/m^3) y ds la densidad del vapor de agua saturado a la temperatura de bulbo seco del aire (kg/m^3). La humedad relativa no es una medida absoluta de la humedad presente en el aire sino que proporciona una medida de la cantidad de agua presente en el aire en relación con la máxima cantidad que puede existir en el aire saturado a esa temperatura (de bulbo seco). Dado que la máxima cantidad posible de agua en el aire se incrementa al aumentar la temperatura es necesario indicar dicha temperatura siempre que se exprese la humedad relativa.

- **Humedad absoluta (HA):** El término "humedad absoluta" (ha), se refiere al peso del vapor de agua por unidad de volumen. Esta unidad de volumen, generalmente es un espacio de un metro cúbico (o un pie cúbico). En este espacio, normalmente hay aire también, aunque no necesariamente. (Ocon García & Tojo Barreiro, 1980)

$$y = \frac{wH_2O}{W_{aire\ seco}} \quad (8)$$

Donde:

W : peso =[kg H₂O]

Y = humedad absoluta [kg ss]

2.4 CONTENIDO DE HUMEDAD DE UN ALIMENTO

Normalmente, el contenido de humedad de una sustancia se expresa en porcentaje en peso sobre base húmeda. Pero el contenido de humedad en base seca (b.s.) es más simple de usar en el cálculo ya que la cantidad de humedad presente en cualquier momento es directamente proporcional al contenido de humedad en b.s. (P. Singh & Heldman, 2014).

El contenido de humedad, m , porcentaje base húmeda es:

$$m = \frac{W_m}{W_m + W_d} \times 100 \quad (9)$$

Donde

W_m Es el peso de la humedad = [kg H₂O]

W_d Es el peso del material seco= [kg/ss]

El contenido de humedad m , b.s, porcentaje es:

$$m = \frac{W_m}{W_m + W_d} \times 100 = \frac{m}{100 - m} \times 100 \quad (10)$$

El contenido de humedad, X , *b.s.* se expresa a veces en decimal como:

$$X = \frac{m}{100} \quad (11)$$

2.4.1 TIPOS DE HUMEDADES

El proceso de secado está controlado por etapas de eliminación de agua las cuales se describen a continuación.

2.4.1.1 Contenido de humedad en equilibrio

Cuando un sólido expuesto a un suministro continuo de aire a temperatura constante y humedad, con una presión parcial fija del vapor, p el sólido perderá humedad por evaporación o ganará humedad del aire hasta que la presión de vapor de la humedad del sólido sea igual a p . El sólido y el gas están entonces en equilibrio con las condiciones en el entorno, esto se conoce como “Contenido de Humedad en Equilibrio” (EMC). La EMC es muy útil para determinar si un producto ganará o perderá humedad bajo un conjunto dado de condiciones de temperatura y humedad relativa, por lo tanto la EMC está directamente relacionada con el secado y almacenamiento. (Chakraverty, 2014)

Generalmente la ECM se determina por dos métodos: (1), El método estático permite que el grano alcance el equilibrio con el aire ambiente circundante sin ninguna agitación y (2) método dinámico, el aire es generalmente movido mecánicamente. Como el método estático es demorado, en humedades relativas altas el crecimiento del moho en el grano puede tener lugar antes de alcanzar el equilibrio.

2.4.1.2 Contenido de humedad ligada

Esto se refiere a la humedad contenida por una sustancia que ejerce menos presión de vapor de equilibrio que la del líquido puro a la misma temperatura. La

humedad ligada puede estar contenida dentro de las paredes celulares de la estructura de la planta, en combinación química suelta con el material celulósico, mantenida en pequeños capilares y grietas en todo el sólido. (Chakraverty, 2014)

2.4.1.3 Contenido de humedad no ligada

Esto se refiere a la humedad contenida por una sustancia que ejerce una presión de vapor de equilibrio igual a la del líquido puro a la misma temperatura.

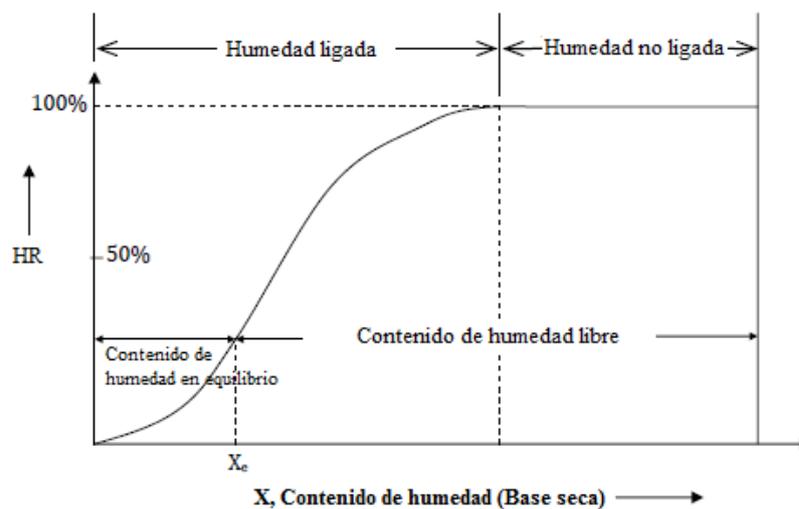


Figura 18: Tipos de contenidos de humedad

Fuente: Mujumdar (2010)

2.4.1.4 Contenido de humedad libre

La humedad libre es la humedad contenida por una sustancia que excede la humedad de equilibrio, $X - X_E$ (figura 18). Sólo se puede evaporar la humedad libre y el contenido de agua de un sólido depende de la concentración de vapor en el aire. Las relaciones mencionadas se muestran en la figura 18 para un sólido de contenido de humedad X expuesto al aire de humedad relativa RH .

En la figura 19 se muestra una curva de secado típica. Esta cifra muestra claramente que hay dos períodos importantes de secado, a saber, el período de tasa constante y el período de la tasa de caída. Las parcelas de contenido de humedad

frente al tiempo de secado o velocidad de secado en función del tiempo de secado o tasa de secado frente al contenido de humedad se conocen como curvas de secado. (Chakraverty, 2014)

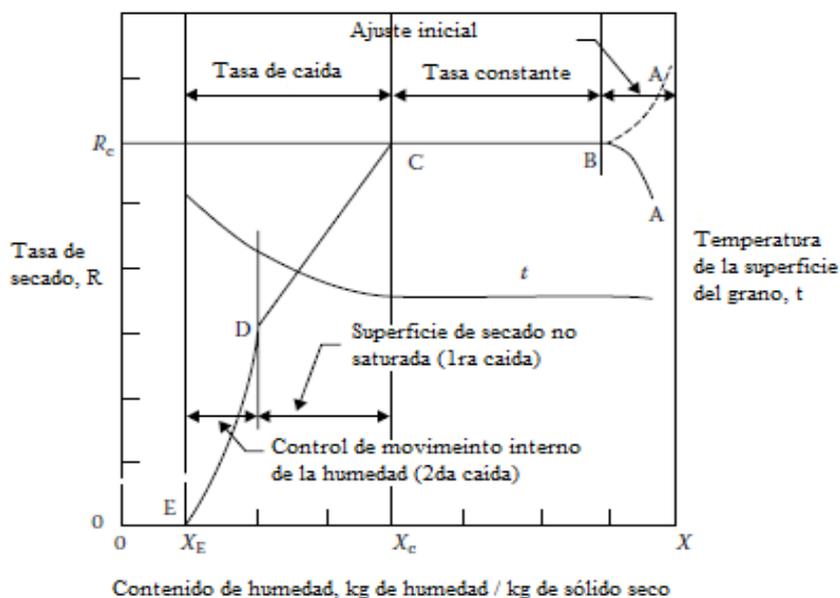


Figura 19: Curva de velocidad de secado típica, condición de secado constante.

Fuente: (Chakraverty, 2014)

2.4.2 MEDICIÓN DE LA HUMEDAD

El contenido de humedad se puede determinar por métodos directos e indirectos. Métodos directos Incluyen el método de secado por aire-horno ($130^{\circ}C \pm 2^{\circ}C$) y el método de destilación. Los métodos Directos son sencillos y precisos, pero requieren mucho tiempo, mientras que los métodos indirectos son convenientes y rápidos pero menos precisos.

2.4.2.1 Métodos directos

El método de secado por aire / horno se puede llevar a cabo en una sola etapa o en una etapa doble de acuerdo con las muestras de grano que contienen menos o más del 13% de contenido de humedad.

Método de una sola etapa

El método de una sola etapa consta de los siguientes pasos:

1. Moler 2-3 g de muestra.
2. Mantenga la muestra en el horno durante aproximadamente 1 h a $130^{\circ} \text{C} \pm 2^{\circ} \text{C}$.
3. Colocar la muestra en un desecador y luego pesar después de enfriar.

Método de doble etapa

1. En este método, mantener 25-30 g de muestra de grano entero en el horno de aire a $130^{\circ} \text{C} \pm 2^{\circ} \text{C}$, durante 14-16 h para que su contenido de humedad se reduzca a aproximadamente 13%.
2. A continuación, siga el mismo procedimiento que en el método de una sola etapa.

Otros métodos

Colocar la muestra de grano entero en el horno de aire a $100^{\circ} \text{C} \pm 2^{\circ} \text{C}$ durante 24-36 h dependiendo del tipo de grano y luego pesarlo.

El método de secado en horno de vacío también se utiliza para determinar el contenido la humedad. Sin embargo, la determinación de la humedad debe hacerse de acuerdo con la norma para cada cereal establecido por el Gobierno o por la Asociación de Químicos Agrícolas. (Chakraverty, 2014)

Método de destilación Brown-Duvel

El método de destilación mide directamente el volumen de humedad, en cc condensado en un cilindro de medición calentando una mezcla de 100 g de grano y 150 cc de aceite en un matraz a 200°C durante 30-40 min.

El contenido de humedad puede medirse también por el método de destilación de tolueno. (Chakraverty, 2014)

2.4.2.2 Métodos indirectos

Los métodos indirectos se basan en la medición de una propiedad del grano que depende del contenido de humedad. Dos métodos indirectos se describen a continuación.

Método de resistencia eléctrica

Mide la resistencia eléctrica de un medidor de acuerdo a la cantidad de muestra de grano a una compactación dada (densidad aparente) y temperatura. La resistencia eléctrica varía con la humedad, temperatura y grado o compactación.

El medidor de humedad universal (Estados Unidos), la humedad de Tag-Happenstall (Estados Unidos) y el medidor de humedad Kett (Japón) son un tipo medidores de humedad. Toman sólo 30 s para la medición de la humedad. (Chakraverty, 2014)

Método dieléctrico

Las propiedades dieléctricas del grano dependen de su contenido de humedad. En este tipo de medidor de humedad, una muestra de 200 g de grano se coloca entre sus placas y se mide la capacitancia. La capacitancia medida varía con la humedad, la temperatura, y grado de compactación.

El medidor de humedad Motomco (Estados Unidos) y la humedad de Burrows, son algunos de los medidores de humedad de tipo capacitancia. Toma alrededor de 1 min para medir la humedad. Estos también se conocen como cultivo seguro de probadores de humedad ya que no dañan la muestra de grano. (Chakraverty, 2014)

2.4.3 ACTIVIDAD DE AGUA

Durante la recolección y las etapas subsiguientes que intervienen en el procesamiento, los productos alimenticios son propensos a diferentes tipos de

daños que involucran daños mecánicos, físicos, químicos y microbianos. Los daños mecánicos y físicos pueden contribuir a mejorar los daños químicos y microbianos. El crecimiento microbiano puede resultar en la pérdida de características sensoriales de los alimentos y en muchos casos los daños a los alimentos serán de calidad inaceptable.(Jangam, Law, & Mujumdar, 2010).

El crecimiento microbiano puede ocurrir durante el procesamiento y almacenamiento posterior a la cosecha y el principal contaminante son el suelo, el agua, el aire y los animales. Los principales microorganismos que contribuyen a estos daños son las bacterias, los hongos (mohos y levaduras), los protozoos, sin embargo, los insectos también pueden contribuir al daño microbiano (Mujumdar 2004).

La actividad del agua (a_w) es uno de los factores más críticos en la determinación de la calidad y seguridad de los bienes que se consumen diariamente. La actividad del agua afecta el tiempo de conservación, la seguridad, la textura, el sabor y el olor de los alimentos. (Jangam et al., 2010)

La actividad de agua (a_w) es un parámetro que indica la disponibilidad de agua en un alimento para que existan reacciones químicas y bioquímicas (Por ejemplo: oxidación de lípidos, reacciones enzimáticas, reacción de Maillard y desarrollo microbiano). (Calle Benites y Aparicio Baidal, 2011)

La actividad de agua se define como la relación entre la presión parcial de vapor de agua sobre el alimento (P_a) y la presión de vapor de saturación del agua pura a la misma temperatura (P_{a0}).

$$a_w = \frac{P_a}{P_{a0}} \quad (12)$$

En general, un alimento con actividad de agua inferior a 0,7 es estable a la mayoría de las causas de deterioro físico, químico o biológico; por debajo de 0,6 es muy estable al deterioro por microorganismos (Puerta, 2013).

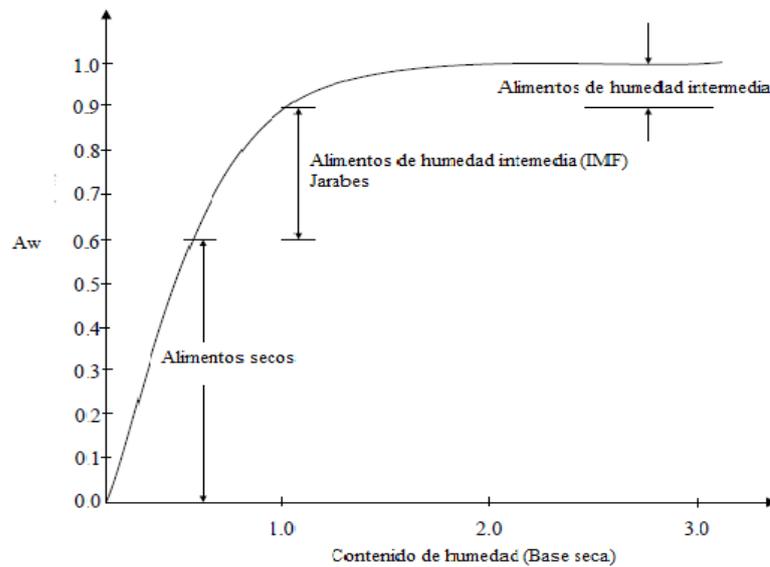


Figura 20: Actividad de agua versus contenido de humedad para diferentes tipos de alimentos

Fuente: Mujumdar, (2010)

Por lo tanto, a_w , que también es igual a la humedad relativa de equilibrio del aire húmedo circundante, se define como:

$$a_w = \frac{P}{P_w} = \frac{RH_{eq}}{100} \quad (13)$$

El secado de café es un proceso que impide el deterioro por lo tanto conserva su calidad Si el grano de café pergamino contiene un valor de humedad superior a 12,5% (bh) existe el riesgo de deterioro microbiológico causado por hongos y bacterias, daño físico, pergamino manchado y decoloración de la almendra, pérdida de la calidad de la bebida, sabores sucio, mohoso, terroso y de reposo. (Puerta, 2013)

2.5 SECADO POR LECHO FLUIDIZADO

Los secadores de lecho fluidizado (FBD) se utilizan ampliamente para el secado de materiales particulados húmedos y granulares, e incluso pastas, pastas y suspensiones, que pueden fluidizarse en lechos de sólidos inertes. Se utilizan comúnmente en el procesamiento de muchos productos tales como productos

químicos, carbohidratos, productos alimenticios, biomateriales, productos de bebidas, cerámica, productos farmacéuticos en polvo o en forma aglomerada, productos para el cuidado de la salud, pesticidas y productos agroquímicos, colorantes y pigmentos, detergentes y agentes tensioactivos, fertilizantes, polímeros y resinas, y taninos.

También son útiles en la fabricación de productos para calcinación, combustión, incineración, procesos de gestión de residuos y procesos de protección del medio ambiente. Ventajas importantes del funcionamiento en lecho fluidizado incluyen una buena mezcla de sólidos, altas velocidades de transferencia de calor y masa, y transporte de material fácil. (Mujumdar A. S., 2014)

La fluidificación es el estado que se produce en un sólido disgregado cuando, atravesado por una corriente de aire en flujo cruzado, éste se expande, burbujea y las partículas quedan en suspensión, sin llegar al transporte neumático. La fuerza de empuje del aire equilibra el peso de las partículas atravesadas por la corriente; el sólido pasa a comportarse como si fuera un líquido (Fontal & Mauricio, 2010).

Las velocidades de aire que se requiere para conseguir esta fluidización varían con el producto y también con el tamaño de la partícula y su densidad.

2.5.1 PRINCIPIO DE FLUIDIZACIÓN

Los sistemas que involucran sólidos y gases se pueden clasificar por el movimiento que presentan los sólidos. A bajas velocidades de gas, el fluido se filtra por los huecos de las partículas sin movimiento alguno y el sólido se encuentra en un lecho fijo. Si la velocidad aumenta, las partículas se alejan entre sí y llegan a arrastrarse por el fluido. De esta forma, los sólidos se encuentran en fluidización (Domínguez, 2006).

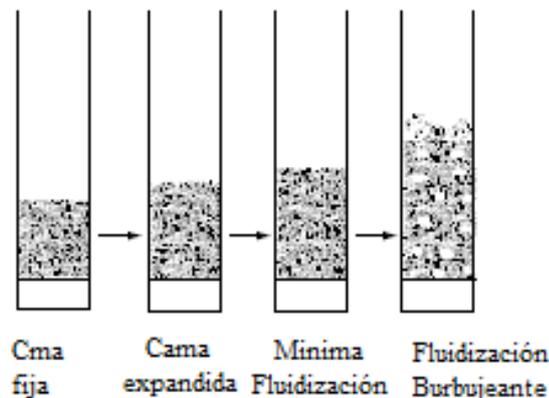


Figura 21: Fases del lecho al aumentar la velocidad del gas

Fuente: (Mujumdar A. S., 2014)

En el momento de la fluidización puede notarse una diferencia, si el fluido se trata de un líquido o un gas. Un líquido continuaría con la expansión uniforme del lecho por el incremento de la velocidad del flujo, sin embargo si el fluido se tratase de un gas la expansión ya no sería uniforme y sería interrumpida por cavidades. Este comportamiento depende de las propiedades del fluido gaseoso, de las partículas con las que se cuente, el diseño del lecho y del tipo de distribuidor usado. (Nava, 2004)

2.5.2 SECADO DE GRANOS EN LECHO FLUIDIZADO

Las semillas y granos, que tienen un alto valor nutricional, son productos importantes en la industria alimentaria. Los granos, en general, son cosechados en el campo y tienen altos contenidos de humedad. Para el almacenamiento y acondicionamiento, es esencial disminuir el contenido de humedad del grano mediante un proceso de secado eficiente. La selección y el diseño del secador, las condiciones de operación y la influencia de estos parámetros sobre la calidad final del producto son características muy importantes a tener en cuenta en el análisis del secado de granos. Las investigaciones muestran buenos resultados en términos de contenido de humedad final. (Rocha & Taranto, 2008)

Sin embargo, debido a la limitación de su escala de producción, se construyeron y ensayaron una de las pocas camas de descarga industrial Madhiyanon et al (2001), para el secado continuo de arroz. La capacidad del secador era de alrededor de 3500 kg / h de arroz con contenido de humedad inicial en el rango de 14 a 25%. Evaluaron el consumo de energía térmica, que estaba en el rango de 3,1 a 3,8 MJ / kg de agua evaporada, comparable a la de otros secadores comerciales. Además de la dificultad de aumentar la escala, la mayoría de los granos se vuelven frágiles cuando se someten a un movimiento, fluidizado o SBD, que se debe a la exposición a condiciones severas de desgaste. Por lo tanto, el uso de un proceso de secado intermitente podría ser rentable e incluso necesario para mantener la calidad del producto (especialmente cuando se trata de semillas de granos). (Rocha & Taranto, 2008)

Los secaderos de lecho fluidizado pueden presentar muchas formas, pero básicamente constan de una simple cámara provista en su base de una rejilla para distribuir uniformemente el gas caliente a todo lo ancho y largo del lecho. Usualmente la sección cercana a la rejilla es desmontable, para facilitar su limpieza, la parte superior suele terminar en punta para reducir el arrastre de polvo dependiendo del producto a secar (Casp Vanaclocha, 2008).

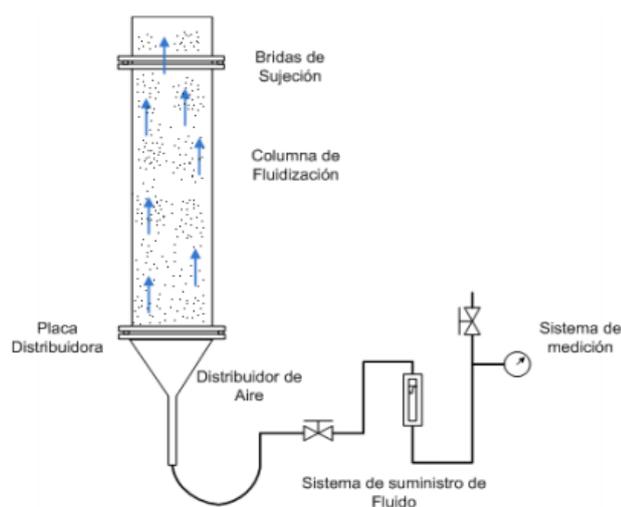


Figura 22: Esquema de secaderos de lecho fluidizado

Fuente: (Casp. 2008)

2.5.3 TIPOS DE SECADORES DE LECHO FLUIDIZADO

Varios tipos de FBD han sido estudiados, desarrollados y operado en muchos procesos industriales según el respectivo proceso, producto, seguridad operativa y requisitos. Es importante familiarizarse con Las características específicas de los diferentes tipos de lecho fluidizado Para hacer una selección lógica y rentable.

2.5.3.1 Secadores de lecho fluidizado Convencionales

Los secadores convencionales según el tipo de material a secar se clasifican en:

2.5.3.1.1 Secador en lotes

Un FBD de lote se utiliza cuando la capacidad de producción requerida es pequeña (normalmente 50-1 000 kg / h) o cuando varios productos se van a producir en la misma línea de producción. Es preferible operar de forma discontinua si los procedimientos de aguas arriba y de aguas abajo se hacen funcionar en modo discontinuo, o se deben llevar a cabo varios procesos en secuencia (por ejemplo, mezcla, secado, granulación / recubrimiento, enfriamiento) en la misma unidad de procesamiento. (Mujumdar A. , 2006)

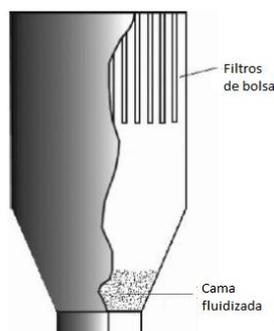


Figura 23: FBD- Convencional- En lotes

Fuente: (Mujumdar A. , 2006)

2.5.3.1.2 Secadores de lecho fluidizado Bien mezclado y Continuo

El FBD bien mezclado y continuo es uno de los FBD más comunes usados en la industria. A medida que el lecho de partículas se mezcla perfectamente, la

temperatura del lecho es uniforme y es igual a las temperaturas del producto y de los gases de escape. Sin embargo, la distribución del tiempo de residencia de las partículas es necesariamente amplia, lo que da como resultado una amplia gama de contenido de humedad del producto.

Por otra parte, a medida que el material de alimentación se carga continuamente en el lecho fluidizado de partículas relativamente secas, esto da la ventaja añadida de una capacidad de fluidización mejorada y una mejor calidad de fluidización. (Law, 2006)

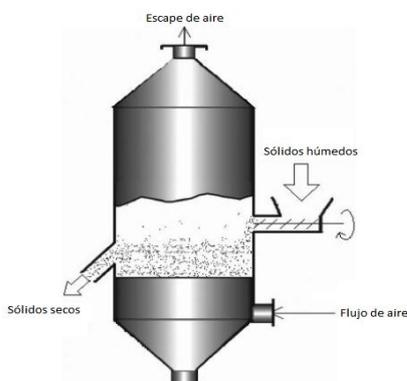


Figura 24: FBD- Convencional-Bien mezclado y Continuo

Fuente: (Mujumdar A. , 2006)

2.5.3.1.3 Secadores de lecho fluidizado Semi-continuos

En el sistema de secado semi-continuo de lecho fluidizado, la cámara de secado consiste en una serie de subprocesadores. El producto húmedo se dosifica y carga con precisión en los lotes. El producto es transportado por lotes de un procesador a otro procesador o los lotes (los procesadores con los lotes de producto) giran a lo largo de la línea de proceso. Esto proporciona un funcionamiento continuo ininterrumpido durante un largo período. La figura muestra un diagrama esquemático de una FBD semi-continua en la que se hacen girar los lotes. Además, la temperatura y velocidad del gas en diferentes lotes pueden ser variadas. (Mujumdar A. , 2006)

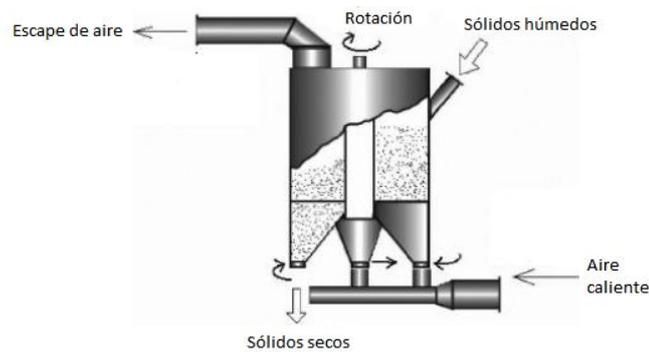


Figura 25: FBD- Convencional- Semi-continuo

Fuente: (Mujumdar A. , 2006)

2.5.3.1.4 Secadores de lecho fluidizado de Flujo de enchufe

En FBDs de flujo de enchufe, se insertan deflectores verticales para crear una trayectoria de flujo de partícula estrecha, dando así una distribución de tiempo de residencia de partícula relativamente estrecha. Las partículas fluyen continuamente como un tapón desde la entrada hacia la salida a través de la trayectoria. Esto asegura un tiempo de residencia prácticamente igual para todas las partículas independientemente de su tamaño y asegura un contenido uniforme de humedad del producto. Se pueden diseñar varios caminos, como trayectorias espirales. (Mujumdar A. , 2006)

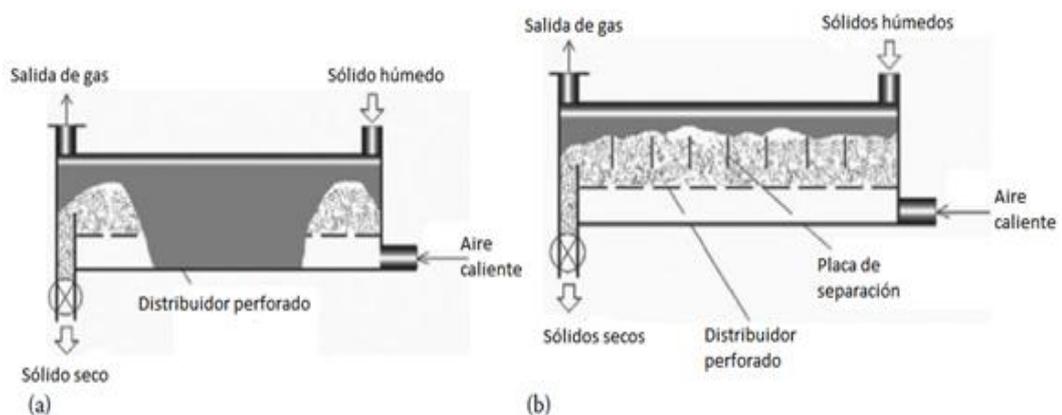


Figura 26: FBD- Convencional- Flujo de enchufe

Fuente: (Mujumdar A. , 2006)

2.5.4 CINÉTICA DE SECADO FLUIDIZANTE

Pese a que el proceso de secado ya ha sido investigado aún no se domina, ni se ha explotado lo suficiente. Por ejemplo en ciertos campos se ha observado que existen problemas referentes a la degradación térmica y la seguridad de la operación, provocando que el proceso de secado a altas temperaturas o a largos tiempos de exposición, pueda originar la degradación parcial de los productos, afectando así su calidad.

2.5.4.1 Curvas de secado

Para el secado de granos en lecho fluidizado se analiza el comportamiento de la humedad al pasar el tiempo y se grafican curvas donde se pueda apreciar los puntos claves de la operación de secado es decir; humedad libre, humedad de equilibrio, así como también las velocidades de secado.

Un proceso de secado es usualmente descrito por diagramas construidos con las siguientes coordenadas:

1. Contenido de humedad del material contra tiempo de secado (curva de secado).
2. Velocidad de secado contra contenido de humedad del material (curva de velocidad de secado).

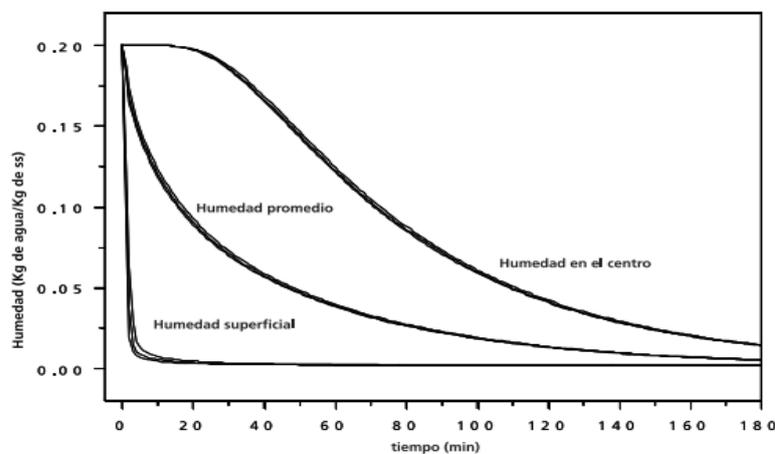


Figura 27: Perfil de humedad en un secador de lecho fluidizado

Fuente: (Domínguez, 2006)

La curva gruesa muestra el comportamiento característico de un periodo de velocidad constante con una derivada igual a cero al comienzo. El periodo decreciente no cuenta con ese comportamiento. Estas curvas de secado se verán influenciadas por los valores de temperatura y velocidad del aire que se establezcan para la investigación. (Curva delgada). (Domínguez, 2006)

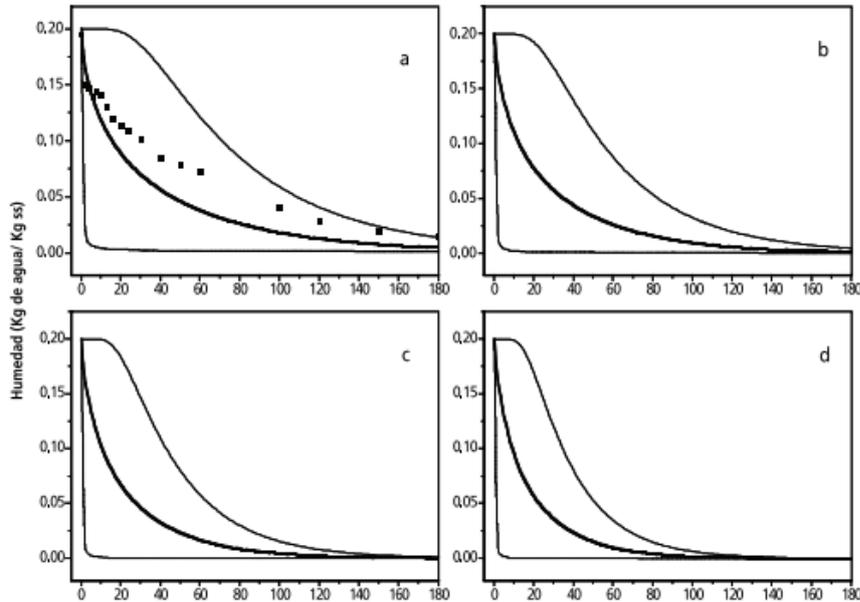


Figura 28: Perfiles de humedad en el secador a diferentes temperaturas

Fuente: (Domínguez, 2006)

Las curvas mostradas alcanzan rápidamente la temperatura de alimentación del aire y, por lo tanto, la difusión de la humedad controla el proceso a medida que la temperatura aumenta de 313 K (figura 4a) hasta 343 K (figura 4d). La figura 4a muestra datos experimentales obtenidos de Caballero (1999) y estos se encuentran entre la humedad promedio y la humedad en el centro del grano. (Domínguez, 2006)

2.5.4.2 Curva de velocidad de secado

Este tipo de curva indica con que velocidad se seca el material. Este diagrama es muy útil para diferentes propósitos, donde se muestra la cantidad de humedad

removida desde el material secado en unidad de tiempo por unidad de superficie secada.

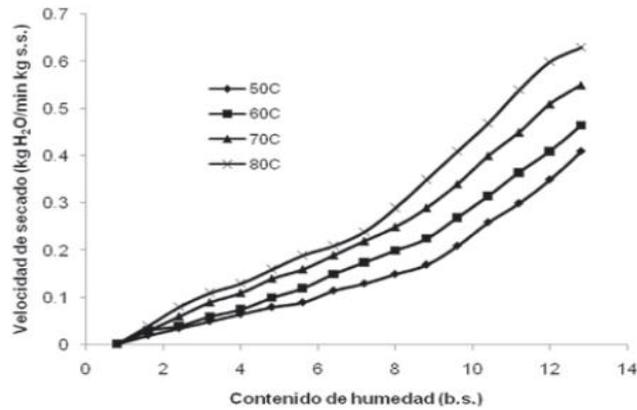


Figura 4. Curvas de velocidad de secado a diferentes temperaturas para nopal escaldado.

Figura 29: Curva de velocidad de secado en lecho fluidizado

Fuente: (Nava, 2004)

2.5.4.3 Modelos matemáticos de la cinética de secado

Para determinar la cinética del secado y establecer las diferencias entre los tratamientos existen ciertos artificios matemáticos que permiten agilizar el proceso de toma de datos. La razón de humedad (MR), un contenido de humedad adimensional se puede calcular de acuerdo a:

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_o - M_e} \quad (14)$$

Donde M_o , M_t y M_e son el contenido de humedad inicial, en cualquier momento (t) y en el equilibrio respectivamente.

El contenido de humedad en el equilibrio (M_e) es extremadamente pequeño comparado con el contenido de humedad inicial (M_o) y en cualquier momento (M_t), por lo que se puede omitir de la ecuación anterior. (Sacilik y Elicin, 2006; Wang *et al.*, 2007)

Esta forma de medir la humedad “en cualquier momento” nos resulta de gran utilidad al comparar la cinética del secado en cada una de las curvas; se toma un tramo de la curva y se analiza el tiempo en minutos (TAU), es decir, tiempo que tarda en pasar de un punto fijo de humedad a otro. De esta manera podremos deducir cuales son las mejores condiciones de deshidratado.

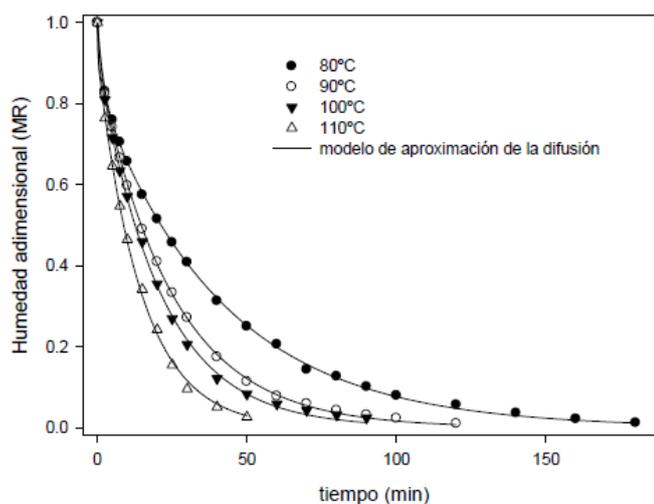


Figura 30: Cinética de secado (razón de humedad en función del tiempo)

Fuente: (Flores & de Jesús, 2011)

Muchos modelos matemáticos de secado en lecho fluidizado han sido propuestos en la literatura los cuales se verificaron con datos experimentales. Estos modelos se han desarrollado sobre la base de diferentes supuestos. Entre los más similares a la investigación están:

Modelo se Lewis o Exponencial

El modelo de Lewis es el modelo más simple utilizado para ajustar los datos experimentales de las cinéticas de secado, describe la transferencia de humedad de los alimentos, biomateriales y materiales o productos agrícolas. El modelo de Lewis ve de manera análoga que el flujo de calor desde el cuerpo sumergido en un fluido frío. Este modelo asume que la resistencia interna es despreciable, lo que significa que no hay resistencia en el movimiento o desplazamiento de la humedad del interior del material hacia la superficie del material (Doymaz, 2005; Kashaninejad y col, 2007).

La velocidad de secado es proporcional a la diferencia de contenido de humedad entre el material de secado y el contenido de humedad de equilibrio en la condición del aire de secado. Este modelo puede ser escrito como:

$$MR = \frac{M - M_e}{M_o - M_e} = \exp(-kt) \quad (15)$$

Donde, k es la constante del modelo y t es el tiempo.

Modelo de Henderson y Pabis

El modelo de Henderson y Pabis es el primer término de una solución general de las series de la segunda ley de Fick. Este modelo también es conocido como modelo exponencial bi-paramétrico (Iguazú y col, 2003). La pendiente de este modelo, el coeficiente k, está relacionada con la difusividad efectiva de la humedad cuando el proceso de secado se lleva a cabo sólo en el período decreciente y el control del proceso es por la difusión del líquido (Doymaz, 2005; Gazor y Mohsenimanesh, 2010).

$$MR = \frac{M - M_e}{M_o - M_e} = a \exp(-kt) \quad (16)$$

Donde, a y k son constantes del modelo y t es el tiempo.

Modelo de Page

El modelo de Page es una modificación empírica del modelo de Lewis, que corrige algunas deficiencias. Este modelo sugiere la utilización de dos constantes empíricas, las cuales han demostrado buenos ajustes para describir el secado de diversos productos agrícolas, como la soja, judías verdes, maíz y nueces de pistacho (Iguaz y col, 2003; Doymaz, 2005; Rafiee y col, 2009; Kashaninejad y col, 2007). El modelo está dado por:

$$MR = \frac{M-M_e}{M_o-M_e} = a \exp(-kt^N) \quad (17)$$

Donde, k y N son constantes del modelo

Modelo exponencial de dos términos

Este modelo es una parte de la serie infinita de exponenciales negativos derivados de la solución general de la ecuación de difusión. Esta solución se aplica independientemente de la geometría de las partículas y las condiciones del ambiente, pero asume que la difusividad es constante (Iguaz y col, 2003; Rafiee y col, 2009; Shen y col, 2011).

$$MR = \frac{M-M_e}{M_o-M_e} = a_1 \exp(-k_1 t) + a_2 \exp(-k_2 t) \quad (18)$$

Donde a1, a2, k1, k2 son las constantes del modelo.

Modelo logarítmico

Este modelo es una modificación del modelo de Henderson y Pabis con una constante empírica adicional (c). Este modelo ha sido utilizado con éxito para el ajuste de las cinéticas de secado en diferentes condiciones de operación, tal es el caso de semillas de *Jatropha curcas* L., granos, aceitunas verdes y semilla de calabaza (Demir y col, 2007; Sacilik, 2007; Sirisomboon y Kitchaiya, 2009).

$$MR = \frac{M-M_e}{M_o-M_e} = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt) \quad (19)$$

Modelo de difusión

Este modelo supone que el secado de partículas individuales en un lecho fluidizado es totalmente controlado por la difusión de humedad dentro de la partícula. Para el análisis de secado de partículas, se puede utilizar la ecuación de difusión para esferas de un diámetro equivalente. Zahed y

Epstein desarrollaron un modelo de difusión para el secado del lecho del vertido y posteriormente Martínez, Vera, aplicaron el mismo modelo para el secado en lecho fluidizado. (Mujumdar & Law, 2006)

Este modelo supone lo siguiente:

- Los sólidos son esféricos, isotrópicos, de tamaño uniforme y homogéneo. Están perfectamente bien mezclados en el lecho.
- Las propiedades físicas de los sólidos secos permanecen constantes con el tiempo.
- La contracción de sólidos y gradiente de temperatura dentro del solido son insignificantes.
- La cinética de secado se rige por la difusión interna de humedad. Por lo tanto, la humedad en la superficie solida está en equilibrio con la humedad del aire de la cama.
 - El aire está perfectamente mezclado. El aire de escape está en equilibrio térmico con el lecho.
 - El secador está perfectamente aislado.

La difusividad se supone constante. La siguiente ecuación de difusión define el transporte de humedad:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D \left[\left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} \right) + \frac{2}{r} \left(\frac{\partial X}{\partial r} \right) \right] \quad (20)$$

Donde

X es el contenido de humedad libre, que está en exceso del valor de equilibrio

D es la difusividad (m²/s)

r dimensión radial (m)

Si la difusividad es variable y depende de la distancia radial del límite de secado desde el centro de los sólidos, se utiliza la siguiente ecuación de difusión:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D \left[\left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} \right) + \frac{2}{r} \left(\frac{\partial X}{\partial r} \right) \right] + \frac{\partial D}{\partial X} \left(\frac{\partial X}{\partial r} \right)^2 \quad (21)$$

Una vez que se conoce la difusividad, se aplica un análisis numérico a la ecuación de difusión para encontrar el perfil de contenido de humedad dentro del sólido. La difusividad de diversos productos alimenticios se puede obtener de Sablani et al. [35]. El contenido medio de humedad \bar{X} , puede obtenerse a partir de la siguiente ecuación:

$$\bar{X} = \frac{4\pi}{V_p} \int_0^{r_p} r^2 X dr \quad (22)$$

Donde

V_p Volumen de la partícula (m^3). Obsérvese que el contenido de humedad y los valores de difusividad dependientes de la temperatura se pueden utilizar para resolver la ecuación numéricamente.

Modelo Empírico

En este modelo, el proceso de secado se divide en diferentes periodos en los que el mecanismo de secado en cada periodo es diferente. La solución general de la difusión de Fick expresa el contenido de humedad en términos del tiempo de secado en función exponencial. La solución para sólidos esféricos se da en la siguiente ecuación.

$$\frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\pi^2} e^{-n^2(\pi^2 D_{eff} t) / r_{sph}^2} \quad (23)$$

Donde

r_{sph} Es el radio de la esfera (m)

D_{eff} Es la difusividad efectiva (m²/s)

L es el espesor

El subíndice eq indica el equilibrio y o indica el estado inicial

Puesto que la solución general de la ecuación de difusión se expresa como una serie de funciones exponenciales, los datos experimentales obtenidos del secado en lecho fluidizado pueden correlacionarse como una función exponencial. Se han propuesto muchas ecuaciones exponenciales empíricas.

La siguiente ecuación es una simple ecuación exponencial. Se supone que la tasa de secado es proporcional a la diferencia entre el contenido de humedad promedio y el contenido de humedad en equilibrio.

$$\frac{X - X_{eq}}{X_{ind} - X_{eq}} = e^{-kt} \quad (24)$$

Donde el subíndice $cr1$ denota el primer punto crítico que distingue los periodos constantes y decrecientes. Para un modelo de cinética de lecho fluidizado continuo de una sola etapa, los sólidos salen del sistema de lecho fluidizado con una distribución del contenido de humedad debido a la amplia distribución del tiempo de residencia. Se utiliza un valor medio del contenido de humedad y tiempo de residencia. El contenido medio de humedad de los sólidos en un secado en lecho fluidizado continuo viene dado por:

$$\frac{\bar{X}}{X_0} = \int \left(\frac{X}{X_0}\right)_b E(\theta) d\theta \quad (25)$$

Donde

$(X/X_0)_b$ proporción de humedad en el lote FBD

$E(\theta)$ Es la densidad de tiempo de residencia para los sólidos

$E(\theta) = e^{-\theta} \cdot \theta = t/t_{cr1}$, es un tiempo sin dimensiones

El subíndice b denota el proceso por lotes. En el período de tasa constante

$$\frac{X}{X_0} = 1 - \frac{a^t}{X_0} \quad (26)$$

En el período de la tasa descendente,

$$\frac{X}{X_0} = 1 - \frac{a^t}{(b^t + 1)X_0} \quad (27)$$

Para un lecho fluidizado continuo que exhibe periodos de velocidad constante y de caída, el contenido de humedad se da entonces mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{X}{X_0} = 1 - \frac{a^t}{X_0} \left[\frac{b^{t-\theta c}}{b^t + 1} - 1 \right] \quad (28)$$

Donde

$$b = a/(X_{cr1} - X_{eq})$$

$$\theta c = t/t_{cr1}$$

X Contenido medio de humedad

t Residencia media de tiempo

a Es el coeficiente de secado

Una vez que se conoce el contenido de humedad promedio, las ecuaciones obtenidas de las balanzas de masa y energía de los siguientes modelos pueden usarse para calcular la humedad y la temperatura del aire de escape así como la temperatura de los sólidos. El modelo más simple es el modelo monofásico que trata el lecho fluidizado como un continuo. A medida que el número de fases consideradas en el modelo va más alto, el modelo de secado en lecho fluidizado se vuelve más complejo e implica más propiedades de transporte. (Mujumdar & Law, 2006)

2.5.5 EFECTO DE LOS PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO EN EL SECADO DE LECHO FLUIDIZADO

(Flores & de Jesús, 2011), dicen que el secado es un proceso en el que al bajar el contenido de humedad de los alimentos para su preservación, procesamiento, almacenamiento, comercialización y consumo, se pueden afectar las propiedades físicas, fisicoquímicas, cinéticas, nutricionales, químicas y organolépticas, que están a su vez asociadas con la estructura del material, tal y como se muestra en la figura 18.

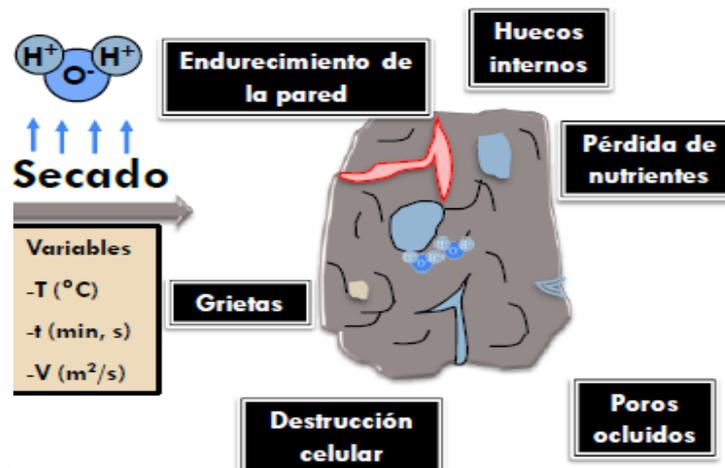


Figura 31: Posibles cambios en la estructura de un alimento debidos al secado

Fuente: (Flores & de Jesús, 2011)

2.5.5.1 Efecto de la altura del lecho

Para materiales con alta movilidad de humedad interna tales como mineral de hierro, resinas de intercambio iónico y gel de sílice, la mayor parte del secado tiene lugar cerca de la placa distribuidora. La altura de la cama no tiene ningún efecto en su velocidad de secado, es decir, que el aumento de la altura del lecho más allá de un valor particular, no conduce a diferencias en las velocidades de secado. Sin embargo, para materiales con resistencia al secado, por ejemplo granos, la velocidad de secado aumenta con el aumento de la altura del lecho hasta alcanzar la saturación. En otras palabras, la tasa de secado local disminuye al aumentar la altura del lecho.

2.5.5.2 Efecto del tamaño de partícula

Para las partículas del grupo B, el tiempo de secado que se requiere para eliminar una cantidad dada de humedad aumenta a medida que aumenta el diámetro de las partículas siempre y cuando todas las otras condiciones permanezcan sin cambios. Sin embargo, este efecto es mucho menor para las partículas del grupo A porque estas partículas son más finas que el grupo B y presentan una fluidización suave antes de entrar en el régimen de fluidización por burbujeo.

2.5.5.3 Efecto de la velocidad del gas

La velocidad del gas tiene un efecto dominante en la eliminación de la humedad superficial. Al aumentar la velocidad del gas aumenta la velocidad de secado. Sin embargo, la velocidad del gas no tiene ningún efecto en las partículas con alta resistencia interna a la transferencia de humedad. La alta resistencia a la humedad interna domina al final de la tasa de caída.

2.5.5.4 Efecto de la temperatura

La temperatura de la cama es aumentada por altos flujos de calor externo. Esto a su vez conduce a mayores difusividades de humedad y, por tanto, mayor velocidad de secado. Este efecto es complejo y depende de la importancia relativa de las resistencias externas e internas a la transferencia de humedad. (Mujumdar A. , 2006)

2.5.6 CARACTERÍSTICAS DE UN LECHO FLUIDIZADO

Anteriormente se mencionó que en un lecho fluidizado se encuentran las partículas suspendidas mediante el flujo ascendente. Por lo mismo es necesario considerar las variables y los procesos que intervienen en el comportamiento del lecho fluidizado. Los procesos son: la mezcla de las partículas sólidas entre sí, la transferencia de calor y masa, y por último el transporte de partículas.

2.5.6.1 Transferencia de calor en lechos fluidizados

La transferencia de calor en la cama fluidizada puede ocurrir por conducción, convección y radiación en función de las condiciones de funcionamiento del equipo. La transferencia de calor entre una sola fase de partículas y el gas puede ser definido por la ecuación convencional de transferencia de calor:

$$q = h_p A_p (T_p - T_g) \quad (29)$$

Donde:

q es la tasa de transferencia de calor (W)

h_p es el coeficiente de transferencia de calor (W/m² K)

A_p es el área de superficie de una sola partícula (m²)

T_p es la temperatura de una partícula (K)

T_g es la temperatura del gas (K)

El valor del coeficiente de transferencia de calor de una sola partícula en un sistema de lecho fluidizado no es generalmente alto. Eso está en el rango de 1-700 W/ (m² °k). Sin embargo, debido a la gran área de intercambio de la superficie, en el orden de 3,000-45,000 m²/m³, se consiguen tasas muy altas de transferencia de calor en el orden de 10⁶ J/ (m³ k). Como resultado térmico se alcanza el equilibrio rápidamente en los secadores de lecho fluidizado (Mujumdar & Law, 2006).

El coeficiente de transferencia de calor convectivo, h , es una función de los parámetros de funcionamiento, las características de las partículas y la geometría del secador. Se puede estimar a partir de las siguientes correlaciones dependiendo del número de Reynolds de la partícula, Rep

$$h = \frac{k_g}{d_p} Nu_p \quad (30)$$

Donde:

k_g es la conductividad térmica del gas (W/(m °K))

d_p es el diámetro de la partícula (m)

Nu_p es el número de partícula Nusselt

Pr_g es el número del gas Prandtl

Para $0,1 < Re_p < 50$, $Nu_p = 0,0282 Re_p^{1,4} Pr_g^{0,33}$

Las variables son las siguientes: la velocidad mínima de fluidización (U_{mf}) la porosidad (ϵ) el número de Reynolds (Re) y la esfericidad (ϕ) de la partícula.

La uniformidad del lecho fluidizado depende del tamaño y de las propiedades de los sólidos.

Cuando se incrementa la velocidad del gas, la porosidad (ϵ) del lecho fluidizado comienza a variar. A velocidades superiores inmediatas a la velocidad mínima de fluidización, existe una expansión del lecho. Si se incrementa la velocidad a una magnitud considerablemente superior a la velocidad mínima se comienzan a producir espacios entre las partículas, que se denominan burbujas, que aumentan proporcionalmente al incremento del flujo del fluido (Medina Micolta & Luna Merchán, 2013).

2.5.6.2 Anomalías en un lecho fluidizado

La figura corresponde al comportamiento idealizado: fluctuaciones en la caída de presión son atribuidas al fenómeno llamado *flujo pistón*, en el cual burbujas empujan grandes cantidades de partículas. Por otro lado, la presencia de caminos preferenciales para el paso del gas produce la anomalía de *canalización*, con valores de caída de presión inferiores a lo esperado. Estas dos anomalías empobrecen el contacto fluido-partícula, motivo por el que deben evitarse o al menos minimizarse. (Reyes Salinas, 2010)

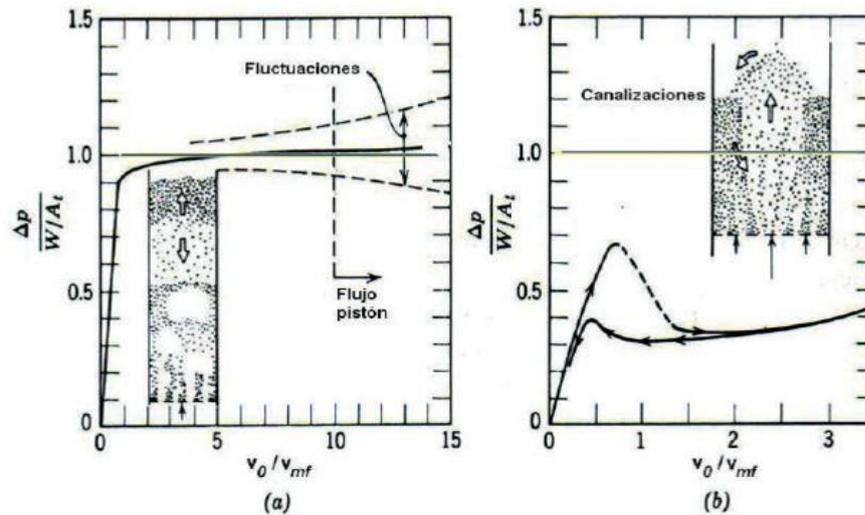


Figura 32: Anomalías en un lecho fluidizado

Fuente: (Reyes Salinas, 2010)

2.5.6.3 Uniformidad del contenido de humedad en los granos

Con el fin de determinar la variabilidad del contenido de humedad de los granos de café sometidos a un proceso de secado en lecho fluidizado, al final de cada práctica se tomaron 3 muestras al azar, de aproximadamente 7 gramos cada una, a las cuales se les determinó el contenido de humedad empleando un método estandarizado.

En la gráfica se presentan las curvas obtenidas para el análisis de uniformidad del contenido de humedad en el proceso de secado de café en lecho fluidizado, a las condiciones de los tratamientos empleados en la investigación. (Fontal & Mauricio, 2010)

Cuadro 2: Resultados obtenidos en el análisis de la uniformidad del contenido de humedad en un proceso de secado de café en lecho fluidizado.

Práctica de secado	Observaciones	Humedad final promedio (%b.h)	Coefficiente de variación (%)	Gradiente máximo (%)
1	20	11.43	2.45	0.6
2	20	11.12	3.36	0.86
3	20	11.86	2.57	0.74

Este proceso se lo llevó a cabo tomando en cuenta las condiciones del tratamiento: temperatura del aire de aproximadamente 49°C y una humedad relativa de aproximadamente 19%. Dando como resultado una uniformidad aceptable del contenido de humedad de los granos, en todos los casos con gradientes máximos de 1% y coeficientes de variación menores de 4%.

2.5.6.4 Calidad de la fluidización

Geldart clasificó las partículas en cuatro grandes grupos, en función de su tamaño y densidad, presentando cada uno un comportamiento característico. Las partículas de los grupos A y B presentan un adecuado comportamiento para ser fluidizadas. Partículas relativamente gruesas (grupo D) son adecuadas para ser fluidizadas en un lecho vibro-fluidizado. En el otro extremo, partículas muy pequeñas se caracterizan por presentar fuertes atracciones entre ellas, dificultando su adecuada fluidización teniendo que emplearse solidos que disminuyan estas fuerzas de atracción, o bien introduciendo agitadores mecánicos para romper estas fuerzas (Reyes Salinas, 2010).

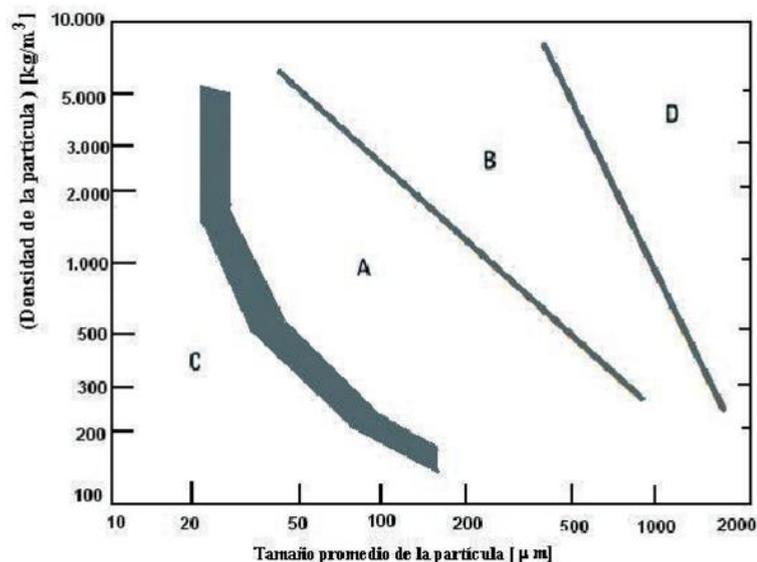


Figura 33: Representación de Geldart

Fuente: (Reyes Salinas, 2010).

2.6 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS ALIMENTOS

Es vital obtener las propiedades de la partícula ya que esos valores ayudan a encontrar factores importantes, tanto teóricos como experimentales de un lecho fluidizado, como la velocidad mínima de fluidización (U_{mf}). Estas propiedades son: esfericidad (ϕ), porosidad (ϵ), densidad (ρ) y el área superficial (A).

2.6.1 TAMAÑO

Las partículas con una forma regular como cubos, bloques rectangulares, cilindros o esferas se pueden caracterizar por sus dimensiones lineales (longitudes) a lo largo de sus ejes principales los cuales permiten conocer sus características como diámetro, altura, tamaño, etc. Además de el volumen y el área superficial de los cuerpos. Los llamados tamaños equivalentes de partículas son dimensiones hipotéticas que se pueden asignar a una partícula modelo (irregular) con el mismo volumen o superficie. (Figura Ludger, 2007)

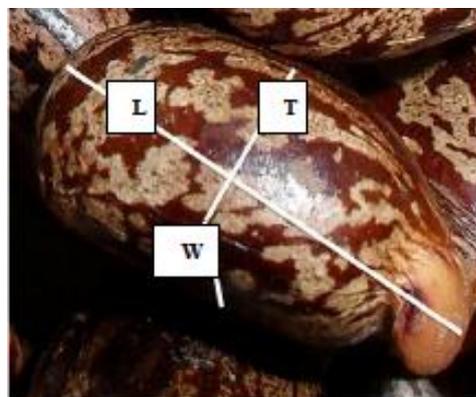


Figura 34: Dimensiones axiales para determinar la esfericidad (L: longitud mayor, W: ancho o longitud menor y T: altura).

Fuente: (Flores & de Jesús, 2011)

Es fácil especificar el tamaño de partículas regulares, pero para partículas irregulares el término tamaño se debe especificar de forma arbitraria. Los tamaños de partículas se expresan en unidades diferentes dependiendo del intervalo de tamaño implicado. Las partículas gruesas se miden en milímetros, las partículas

finas en términos de tamaño de tamiz, y las partículas muy finas en micrómetros o nanómetros. (Sahin et al., 2006)

El tamaño se puede determinar utilizando el método del área proyectada. En este método, se definen tres dimensiones características:

1. Diámetro mayor, que es la dimensión más grande del área máxima proyectada;
2. Diámetro intermedio, que es el diámetro mínimo del área máxima proyectada o el máximo diámetro del área mínima proyectada; y
3. Diámetro menor, que es la dimensión más corta del área mínima proyectada

2.6.2 ESFERICIDAD (\emptyset)

La esfericidad también es un parámetro importante utilizado en el cálculo de flujo de fluidos y transferencia de materia y de calor. La esfericidad o factor de forma se puede definir de diferentes formas.

De acuerdo con la definición utilizada de modo más común, la esfericidad es la proporción de volumen del sólido con respecto al volumen de una esfera que tiene un diámetro igual al diámetro mayor del objeto de modo que puede circunscribir la muestra sólida. Para una partícula esférica de diámetro D_p , la esfericidad es igual a 1 (Mohsenin, 1970).

$$\text{Esfericidad } (\emptyset) = \left(\frac{\text{volumen de la muestra}}{\text{volumen de la esfera circunscrita}} \right)^{1/3} \quad (31)$$

Suponiendo que el volumen de la muestra sólida es igual al volumen de la elipsoide triaxial que tiene los diámetros equivalentes a los de las muestras, se tiene:

$$(\emptyset) = \left(\frac{V_e}{V_c}\right)^{1/3} \quad (32)$$

Donde:

(\emptyset) = esfericidad

V_e =volumen del elipsoide triaxial con diámetros equivalentes (m³)

V_c =volumen de la esfera circunscrita (m³)

Luego la esfericidad es:

$$(\emptyset) = \frac{(abc)^{1/3}}{a} \quad (33)$$

La esfericidad también se define como la razón entre el área superficial de una esfera que tiene el mismo volumen que el objeto al área superficial real (McCabe, Smith y Harriot, 1993):

$$(\emptyset) = \frac{\pi D_p^2}{S_p} = \frac{6V_p}{D_p S_p} \quad (34)$$

Donde:

D_p es diámetro equivalente o diámetro nominal de la partícula (m)

S_p área superficial de una partícula (m²)

V_p volumen de una partícula (m³)

A veces el diámetro equivalente se define como el diámetro de una esfera que tiene el mismo volumen que el de la partícula. Sin embargo, para materiales granulares finos, es difícil determinar el volumen exacto y el área superficial de la partícula. (Sahin et al., 2006)

2.6.3 VOLUMEN

El volumen se define como la cantidad de espacio tridimensional ocupado por un objeto, usualmente se expresa en unidades que son el cubo de las unidades de

longitud, tal como pulgadas cúbicas y centímetros cúbicos, o en unidades de medida de líquidos, tales como galones y litros.

El volumen de los oídos se puede determinar utilizando los siguientes métodos:

1. A partir de las dimensiones características en el caso de objetos con formas regulares.
2. El volumen de los sólidos se puede determinar experimentalmente mediante métodos de desplazamiento de sólidos.
3. Método de procesamiento de imágenes.

2.6.3.1 Método de desplazamiento de líquidos

Si la muestra sólida no absorbe líquido rápidamente, se puede utilizar el método de desplazamiento de líquidos para medir su volumen. En este método, el volumen de los materiales alimenticios se puede medir mediante picnómetros (frascos de gravedad específica) o probetas graduadas con la siguiente fórmula:

$$V_S = \frac{\text{Peso del líquido desplazado por el sólido}}{\text{Densidad del líquido}} = \frac{(W_{pl} - W_p) - (W_{pls} - W_{ps})}{\rho_l} \quad (35)$$

Donde

V_S = volumen del sólido (m³),

W_{pl} = peso del picnómetro lleno de líquido (kg),

W_p = peso del picnómetro vacío (kg),

W_{pls} = peso del picnómetro conteniendo la muestra de sólido y lleno con el líquido (kg),

W_{ps} = peso del picnómetro conteniendo la muestra de sólido (kg),

ρ_l = densidad del líquido (kg/m³).

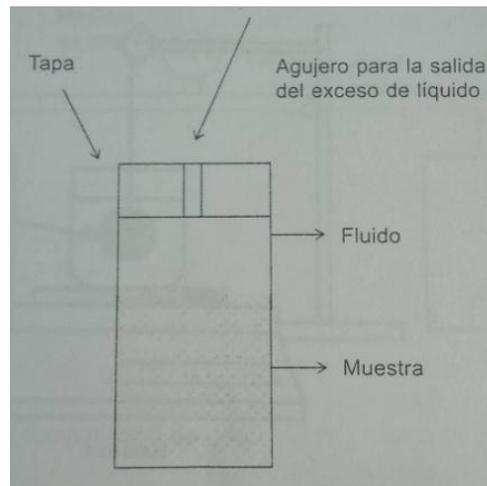


Figura 35: Picnómetro (botella de gravedad específica)

Fuente: (Sahin et al., 2006)

El volumen de una muestra se puede medir por medición directa del volumen de líquido desplazado utilizando una probeta graduada o bureta. La diferencia entre el volumen inicial de líquido en una probeta graduada y el volumen de líquido con el material sumergido da el volumen del material. Es decir, el aumento de volumen después de la adición de la muestra sólida es igual al volumen del sólido. (Sahin et al., 2006)

2.6.4 POROSIDAD (ϵ)

La porosidad del lecho depende de la relación existente entre el diámetro de la partícula, el diámetro del lecho, la rugosidad de las paredes de la columna, la presión y la temperatura de operación (Botterill, 2007).

Para medir el porcentaje de poros en el lecho, se utiliza la siguiente ecuación:

$$\epsilon = \frac{\text{Volumen del lecho} - \text{Volumen de las partículas}}{\text{Volumen del lecho}} \quad (36)$$

2.6.5 DENSIDAD DE LA PARTÍCULA (ρ_p)

La densidad de la partícula se puede determinar de la siguiente manera:

$$\rho_p = \frac{\text{masa de la partícula}}{\text{Volumen de la partícula}} \quad (37)$$

Donde el volumen de la partícula incluye la porosidad. Para las partículas compactas $\rho_p = \rho_{abs}$ (densidad absoluta) y para las partículas porosas $\rho_p < \rho_{abs}$. Para partículas porosas grandes, se utiliza el porosímetro de mercurio para determinar la densidad de las partículas. (Romero, 2006)

$$\alpha = \frac{\pi d^2}{\phi} \quad (38)$$

2.6.6 VELOCIDADES RELACIONADAS EN UN LECHO FLUIDIZADO

En un lecho fluidizado se relacionan cuatro diferentes tipos de velocidades que se presentan en diferentes fases o tipos de lecho, éstas son las siguientes (Isemin, et.al, 2010):

- Velocidad superficial del gas U_0
- Velocidad mínima de fluidización U_{mf}
- Velocidad terminal U_t
- Velocidad mínima de burbujeo U_{mb} .

2.6.6.1 Velocidad superficial del gas (U_0)

Se puede entender como la velocidad en función del área transversa del lecho, se determina cuando en la columna no existen partículas y solo fluye el gas (aire). Se obtiene con la siguiente formula (Ibarz & Ribas, 2005):

$$U_0 = \frac{m}{\rho_g \epsilon_m A t} \quad (39)$$

Donde:

U_0 : Velocidad superficial del gas [m/s]

ϵ_m : porosidad del lecho

ρ_g : Densidad de la masa

m: Masa [m]

At: Área transversal de la columna

2.6.6.2 Velocidad mínima de fluidización (U_{mf})

Se presenta con el aumento mínimo del caudal en el lecho. Se llega a un punto donde las partículas sólidas se encuentran en estado de suspensión causado por el flujo ascendente del gas. Dicho flujo crea una fuerza de arrastre que equilibra la fuerza de gravedad, haciendo que se muevan y se puedan levantar. La (U_{mf}) corresponde a una situación homogénea, en donde no se toman en cuenta las burbujas.

La velocidad mínima de fluidización experimental se determina mediante el análisis de una de las gráficas de la velocidad vs la caída de presión; velocidad vs altura del lecho así como velocidad vs porosidad del lecho. El análisis consiste en ver la tendencia de la curva. Donde hay un cambio es donde se ubica el rango de la velocidad mínima de fluidización. Tanto la velocidad teórica como la experimental deben estar cercanas entre sí, para poder decir que el dato obtenido de U_{mf} es correcto (Aldaco, Irabien, & Luis, 2005).

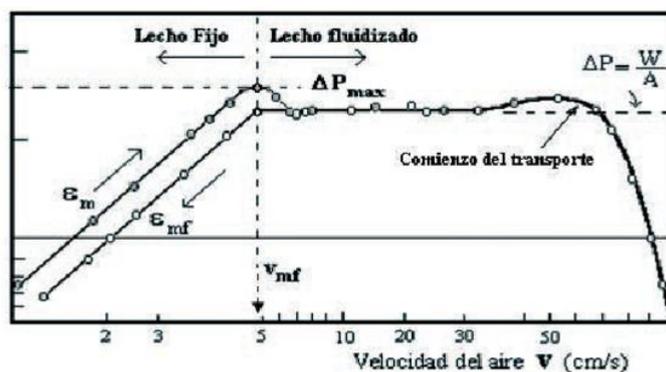


Figura 36: Relación de velocidad del fluido vs caída de presión a lo largo del lecho

Fuente: (Valdez, 2008)

- **Caída de presión.** Cuando el aire fluye de manera ascendente a través del lecho fijo sin ninguna restricción en la superficie, la caída de presión ΔP incrementa linealmente con la velocidad del fluido hasta el

punto en que el grano empieza a levantarse, es decir que la fuerza del aire equilibra al peso del grano, la caída de presión en este punto se mantiene constante, como se observa a continuación (Jaramillo Calle & Narváez Quiranza, 2012).

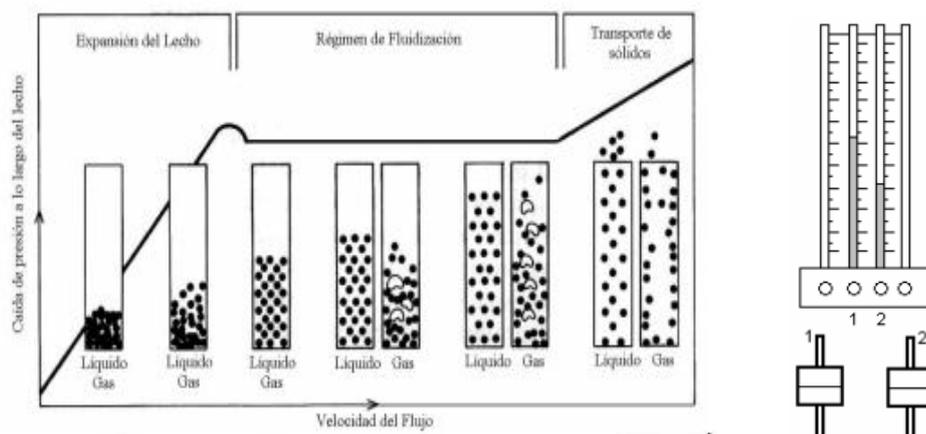


Figura 37: Esquema de la medición de la caída de presión

Fuente: (Reyes Salinas, 2010)

La velocidad de mínima fluidización se puede determinar sobre la base de fórmulas teóricas, así como sobre la base de una serie de fórmulas empíricas. Todas estas fórmulas fueron obtenidas bajo ciertas condiciones, por ejemplo, rango de tamaño de partícula, densidad del gas fluidizante, densidad de las partículas, rango de número de Reynolds y número de Arquímedes. También algunas correlaciones están destinados a la distribución del tamaño de partícula de baja dispersión y por lo tanto el valor real de la velocidad mínima de fluidización para la cama multidispersa con una distribución de partículas mucho más amplia puede diferir del valor calculado.

Una de las expresiones teóricas más utilizadas es la ecuación de Ergun (3), Ergun, (1952) que proporciona la caída de presión del flujo de fluido a través de un lecho fijo de partículas y puede ser utilizada para determinar la velocidad mínima de fluidización.

2.6.6.3 Velocidad terminal (U_t)

Se conoce a la velocidad que está lejos de las paredes de la columna, la cual tiende a aumentar hasta que se vuelve estable. Cuando una partícula del diámetro de d_s cae a través de un fluido, su velocidad terminal de caída libre puede ser estimada. (Gerdart, 2001)

2.6.6.4 Velocidad mínima de burbujeo (U_{mb})

Se presenta en el momento de la expansión homogénea y aparece la primera burbuja. La forma ideal del cálculo de la velocidad es con el aislamiento de una sola burbuja que se comienza a suspender en un recipiente de diámetro grande para evitar que choque en las paredes de la columna.

Aunque esta velocidad es difícil de medir porque en condiciones normales el nacimiento de las burbujas es repentino y se elevan en grupo, las burbujas se pueden unir o partir, mientras que en la columna se ven afectadas y limitadas por las paredes de contacto. (Alfihed, 2007)

2.6.7 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA UTILIZACIÓN DE LECHO FLUIDIZADO EN LA INDUSTRIA.

Las facilidades y complicaciones que se generan dentro de un proceso de fluidización están determinadas por ciertos parámetros que nos permiten puntualizar las ventajas y desventajas como las siguientes:

2.6.7.1 Ventajas del proceso de fluidización

- El lecho de partículas al adquirir las características del fluido facilita las operaciones con el sólido si se trabaja en forma continua.
- Se tiene una temperatura uniforme y controlable, la transferencia de calor y masa entre la superficie de las partículas y el fluido es muy alta.

- La pérdida de presión del flujo es baja, depende de la altura del lecho y la densidad de la partícula.
- Existe uniformidad de la mezcla debido al movimiento del sólido.
- El equipo carece de partes móviles.
- Existe la posibilidad de emplear otras fuentes de energía para el sistema (Jaramillo Calle & Narváez Quiranza, 2012).

2.6.7.2 Desventajas del proceso de fluidización

- Dificultad en la caracterización del tipo de fluido real, ya que se crean sucesos una vez inesperadas como las burbujas en el lecho.
- La mezcla rápida de las partículas dentro del lecho hace que el tiempo de permanencia de cada una de ellas no sea uniforme, esto produce bajo rendimiento del proceso.
- Se requiere un mantenimiento y limpieza constante del sistema.

Pese a las dificultades presentes este fenómeno es de gran utilidad en procesos industriales (Jaramillo Calle & Narváez Quiranza, 2012).

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1 CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El experimento se llevó a cabo en la provincia de Imbabura, ciudad de Ibarra, cantón Ibarra, Parroquia Azaya, laboratorios UTN.

Tabla 3: Ubicación geográfica y condiciones ambientales

Provincia:	Imbabura
Cantón:	San Miguel de Ibarra
Parroquia:	Azaya
Sitio:	Comunidad de Turucu
Temperatura promedio:	18°C
Altitud:	2357 msnm
Humedad relativa:	65%
Precipitación:	500 a 1000mm.año

Fuente: (INAHMI, 2015)

3.2 MATERIALES

3.2.1 MATERIA PRIMA

- Café arábigo *Coffea arábica L.* variedad Caturra

3.2.2 EQUIPOS DE LABORATORIO

- Manómetro

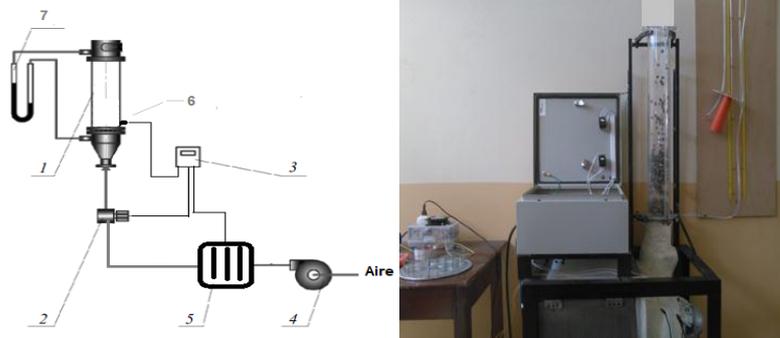
- Reactor de fluidización
- Balanza
- Medidor de humedad en granos
- Mufla
- Anemómetro
- Deshumidificador de aire

3.2.2.1 Maquinaria

- Secador de lecho fluidizado

Esquema de la instalación experimental

Según Cala, (2007), inicialmente se debe construir la instalación experimental la cual tendrá dimensiones de laboratorio, altura de 50 cm y forma cilíndrica para un mejor diseño de rejilla. El esquema de la Instalación experimental se muestra a continuación:



Fotografía 1: Equipo de fluidización

3.2.2.2 Partes del equipo de fluidización.

- 1- Reactor de columna cilíndrica de acrílico transparente
- 2- Control de pulsaciones
- 3- Unidad de captura, almacenamiento y procesamiento de datos.
- 4- Soplador generador de flujo de aire
- 5- Sistema de calentamiento
- 6- Termocupla
- 7- Manómetro diferencial con columna de agua.

El reactor funciona con un flujo de aire a temperatura controlada, de material acrílico transparente que permite la visualización del proceso de fluidización que se estudia, con dimensiones de 100 cm de altura y un diámetro de 10 cm.

El control de todos los parámetros medidos en el proceso, como son temperatura del lecho, velocidad del flujo, se realiza con la Unidad de Captura, almacenamiento y procesamiento de datos de la National Instruments NI cDAQ-9139, la cual realiza la interfase con el reactor y su computador interno a través del Software LabVIEW.

El procedimiento experimental constó de las siguientes partes características de una investigación en lechos fluidizados.

- Clasificación de los granos de café, determinación de sus parámetros físicos y geométricos fundamentales para la organización del lecho fluidizado.
- Estudio gasodinámico con la determinación de la velocidad mínima de fluidización, así como la respuesta de los granos de café al flujo de aire fluidizado.
- Estudio gasodinámico para la determinación de la frecuencia óptima de pulsación.
- Estudio comparativo del secado utilizando lecho fijo, lecho fluidizado y fluidizado pulsante.
- El grado de humedad del café se determinará por el método del muestreo y pesado consecutivo de la muestra.
- Los resultados se analizan comparativamente y se elaborará un modelo para el secado.

3.3 MÉTODOS

En el proceso de secado se utilizó café cereza variedad Caturra con un contenido de humedad inicial de entre el 50 y 70 %, procedente de la parroquia “Juan Montalvo” de la ciudad de Mira, cantón Mira.

Las materias primas que son parte de los productos a elaborarse, deben presentar requisitos y niveles de aceptabilidad, así como también las características de calidad requeridas por la norma INEN 285: 2006. El café en cereza es el fruto de los cafetos en su estado maduro. Las variedades arábicas Typica, Bourbon rojo, Caturra rojo, Catuaí rojo, Pacas, Pache, Catimor, Sarchimor y Cavimor tienen cerezas de color rojo (A., 2015). Para el proceso de secado, estas deben poseer las siguientes características:

- Tiempo de recolectado no mayor a 8 horas
- El índice de madurez rojo intenso para las variedades de frutos de esa coloración, y color amarillo para las variedades con cerezas de dicha coloración.
- Café pintón y verde no mayor al 5%
- Libre de agentes extraños
- Libre de frutos sobre maduros o secos
- Porcentaje de afectación por broca menor al 5%.

A continuación se detalla cada uno de los análisis que se realizó en la operación de secado: en materia prima, durante el proceso y en producto terminado de la variedad en estudio.

3.3.1 EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y GASODINÁMICAS PARA EL CAFÉ.

Para cumplir con este objetivo se realizaron pruebas previas para preparar los parámetros y propiedades de la materia prima con el fin de mantener un mejor control del posterior sistema de fluidización.

Tabla 4: Métodos de evaluación de la materia prima

Propiedad	Métodos	unidad
Humedad	Estufa	%
Volumen	Desplazamiento de líquidos	cm^3
Densidad	Desplazamiento de líquidos	g/cm^3
Diámetro medio	Desplazamiento de líquidos	cm
Porosidad	Velocidad de arrastre	%
Velocidad mínima de fluidización	Gráfico: (velocidad del aire vs caída de presión)	umf

3.3.1.1 Determinación de humedad

Se empleó el método Directo de determinación de humedad de “Doble etapa” es decir utilizando una Estufa a presión de vacío para determinar la perdida cuantitativa de peso y por ende el contenido de humedad durante el proceso de secado.

- **Humedad en base seca**

$$\text{Humedad en base seca (bs)} = \frac{\text{peso de agua}}{(\text{peso de producto} - \text{peso de agua})} * 100 \quad (40)$$

- **Humedad en base húmeda**

$$\text{Humedad en base húmeda (bh)} = \frac{\text{peso de agua}}{\text{peso de producto}} * 100 \quad (41)$$

3.3.1.2 Determinación de la densidad

Para obtener este dato se determinó el volumen aparente y a su vez el volumen real de la muestra. Para determinar el volumen real de la muestra se utilizó el método de “Desplazamiento de líquidos”, (Anexo 4). Para la densidad se toma el peso de la muestra de café utilizada para obtener el volumen y luego se divide ésta masa para dicho volumen, así:

$$\text{Densidad Aparente} = \frac{\text{peso de la muestra}}{\text{volumen aparente}} = \left[\frac{g}{\text{cm}^3} \right] \quad (42)$$

$$\text{Densidad Real} = \frac{\text{peso de la muestra}}{\text{volumen real}} = \left[\frac{g}{\text{cm}^3} \right] \quad (43)$$

3.3.1.3 Determinación del diámetro medio del grano

Para determinar esta propiedad se utiliza la formula siguiente donde despejamos el radio así:

$$r = \sqrt[3]{\left(\frac{3}{4}\right)V/\pi} \quad (44)$$

3.3.1.4 Determinación de la Porosidad

Para obtener la porosidad de los granos se determina un valor llamado “velocidad de arrastre”, la cual se calcula colocando una muestra de café en el reactor y someténdola al aumento gradual de velocidad hasta que en determinado momento los granos de café comienzan a salir del reactor entonces tomamos este dato como velocidad de arrastre.

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_a}{\rho_r} \quad (45)$$

3.3.1.5 Velocidad Mínima de Fluidización

El análisis consiste en ver la tendencia de la curva. Donde hay un cambio es donde se ubica el rango de la velocidad mínima de fluidización, tanto la velocidad teórica como la experimental deben estar cercanas entre sí, para poder decir que el dato obtenido de U_{mf} es correcto.

La velocidad mínima de fluidización experimental se determina mediante el análisis de las gráficas de la velocidad vs la caída de presión, tomando en cuenta la altura del lecho y el diámetro de los cilindros (reactor) de material plexiglass, todo esto para controlar y comparar los cambios gasodinámicos en cada uno de ellos al aumentar o disminuir la velocidad del aire.

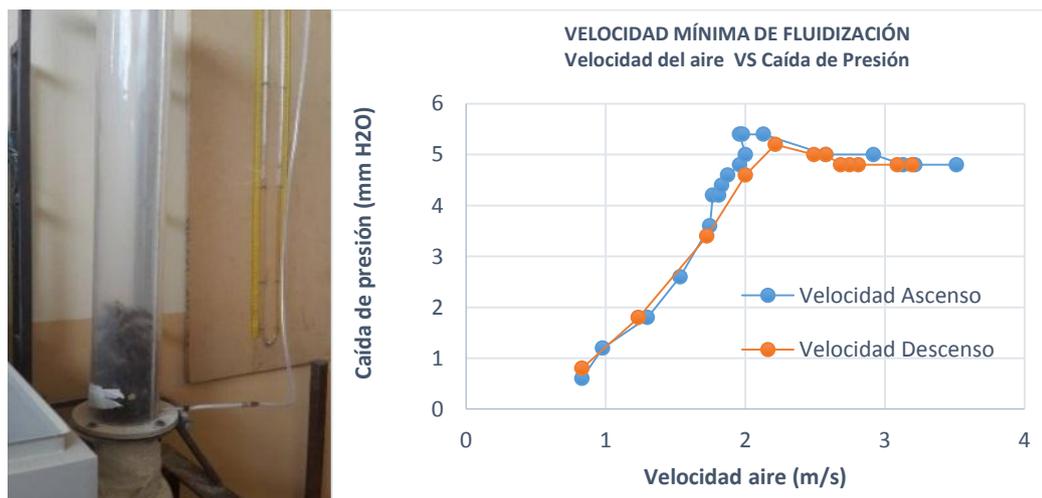


Figura 38: Caída de presión en el lecho en función de la velocidad del gas fluidizante

3.3.2 EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE TEMPERATURA Y VELOCIDAD DEL AIRE.

Para cumplir con este objetivo se planteó un diseño experimental AXB, el cual se describe a continuación:

3.3.2.1 Factores en estudio

Los parámetros en estudio están constituidos por la temperatura y velocidad de aire los cuales se evaluó tomando tres valores para cada factor.

Factor A: Temperatura

- A1: 40° C
- A2: 45° C
- A3: 50° C

Factor B: Velocidad del aire de secado

- B1: 3,9 m/s
- B2: 4,7 m/s
- B3: 5,5 m/s

3.3.2.2 Tratamientos

Se evaluarán 28 tratamientos, producto de la combinación de la temperatura y velocidad de aire, los cuales están detallados en la siguiente tabla.

Tabla 5: Descripción de los rangos de temperaturas (A) y velocidad de aire (B).

TRATAMIENTOS	COMBINACIÓN	DESCRIPCIÓN
T1	A1B1	40° C + 3,9 m/s
T2	A1B2	40° C + 4,7 m/s
T3	A1B3	40° C + 5,5 m/s
T4	A2B1	45° C + 3,9 m/s
T5	A2B2	45° C + 4,7 m/s
T6	A2B3	45° C + 5,5 m/s
T7	A3B1	50° C + 3,9 m/s
T8	A3B2	50° C + 4,7 m/s
T9	A3B3	50° C + 5,5 m/s

3.3.2.3 Características del experimento

- Tratamientos: 9
- Repeticiones: 3
- Unidades experimentales: 27

3.3.2.4 Características de la unidad experimental

El material empleado para cada unidad experimental será aproximadamente 1,5 lb de café, que será sometido al proceso de secado.

3.3.2.5 Esquema del análisis estadístico

Tabla 6: Análisis de Varianza

Fuente de variación	Grados de libertad
Total	26
Repeticiones	2
Tratamientos	8
Factor A	2
Factor B	2
A x B	4
Error Experimental	16

3.3.2.6 Análisis Funcional

Detectada la diferencia significativa en los tratamientos se realizó pruebas de TUKEY para tratamientos; Diferencia media significativa para factores (A y B).

3.3.3 APLICACIÓN DE PULSACIONES AL MEJOR TRATAMIENTO

Se realizó una corrida con el mejor tratamiento aplicando pulsaciones (100 pul/min), al gas fluidizante para comparar su efecto sobre el producto con respecto a una fluidización continua.

Para determinar la influencia de las pulsaciones se utilizó una T pareada donde se hizo mediciones sin pulsaciones y luego se realizaron cortes en el flujo de aire con lo cual se comparó los resultados en donde se define las mejores condiciones de secado.

Para realizar el análisis paramétrico se evaluó la diferencia media significativa entre las medias de los dos grupos o categorías dentro de la misma variable. Para la comparación de las dos medias se extraen las muestras de manera independiente, es decir realizando tomas de datos independientes para cada experimento con pulsaciones y sin pulsaciones en el mejor tratamiento.

Tabla 7: tiempos de secado con y sin pulsaciones

Con pulsaciones	Sin pulsaciones
X	Y
600	300
560	315
580	305
605	300
590	320
587	308

PROBLEMA: ¿Son diferentes las medias de los tiempos de secado en ambos grupos?

Ho: la media de tiempo requerido para el secado es igual en ambos grupos.

- El t test para las dos muestras independientes se basa en el estadístico

$$t = \frac{\bar{X} - \bar{Y}}{\sqrt{\frac{(n-1)\hat{S}_1^2 + (m-1)\hat{S}_2^2}{n+m-2} \left(\frac{1}{n} + \frac{1}{m} \right)}}$$

- n=5 y m=5

\bar{X} (con pulsación) \bar{Y} (Sin pulsación) denotan el tiempo medio en cada uno de los grupos.

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$$

$$\bar{X} = 567$$

$$\bar{Y} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Y_i$$

$$\bar{Y} = 308$$

$$\hat{S}_1^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 = 32,14$$

$$\hat{S}_2^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (Y_i - \bar{Y})^2 = 54,43$$

ENTONCES:

$$TEc = \frac{567-308}{\sqrt{\frac{1}{4} + \frac{1}{4} \sqrt{\frac{4 \times 32,5 + 4 \times 54,43}{4+4-2}}} = 5,96$$

- Si H_0 es cierta el estadístico 1 seguirá una distribución t student con:
 $GL = n+m-2$
 $GL = 4+4-2 = 8$
- Entonces el valor obtenido deberá estar dentro del rango de mayor probabilidad (95%).

$$T \text{ critico} = 1,86$$

$$T (Ec) = 5.96$$

T (Ec) > t critico

Por tanto se rechaza la hipótesis nula. Las pulsaciones afectan en el proceso, prolongando el tiempo de secado.

3.3.4 CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS DEL PRODUCTO SECO

Se determinaron las características fisicoquímicas del producto terminado. Para ello se utilizaron los métodos indicados en la siguiente tabla.

Parámetro	Método	Unidad
Actividad de agua	Espeso enfriado	%
Peso	Balanza analítica	g
Humedad	Estufa	%

3.3.5 UNIFORMIDAD DE HUMEDAD EN LOS GRANOS

Para determinar si el proceso de secado ha sido homogéneo se determinó el contenido de humedad en diferentes muestras tomadas a diferentes alturas del lecho de granos durante la fluidización, con el objeto de garantizar una mejor calidad del producto terminado.

3.4 VARIABLES EVALUADAS

Estas fueron evaluadas utilizando modelaciones matemáticas para la cinética de deshidratación, así como también los análisis químicos y microbiológicos realizados en los laboratorios de la Universidad Técnica del Norte.

Variable	Unidad	Método de ensayo	Frecuencia de aplicación
Tiempo	Minutos	Muestreo	20min
Cinética de secado	-----	Curvas de secado	Durante el proceso
Humedad	%	Estufa	20 min
Actividad de agua	%	Espeso enfriado	Producto terminado

3.4.1.1 Determinación del tiempo de secado

El tiempo de secado se toma desde que el producto ingresa al reactor de fluidización hasta obtener un valor de humedad de entre 10 y 12%. Para comparar las curvas de secado se determinan los tiempos “TAU”, los cuales son tramos fijos de disminución de humedad o en cualquier momento que facilitan la toma de datos durante el experimento.

3.4.1.2 Actividad de agua

Para el análisis de dicha variable se utilizó el siguiente método

1. Calibrar el equipo con cloruro de sodio (0,76 Aw)
2. Pesar 1 a 5 g de muestra seca.
3. Realizar la medición después de un tiempo de 2 horas, requerido por el equipo para que el aire presente en dicha atmósfera se encuentre en equilibrio con el producto.
4. Repetir el proceso hasta obtener un valor aproximado al anterior, para luego realizar la lectura de la muestra. A continuación medir el valor de actividad que presenta la muestra seca. La actividad de agua tendrá un valor máximo de 1 y mínimo de 0.

3.5 MANEJO DEL EXPERIMENTO

3.5.1 DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE SECADO DEL CAFÉ *COFFEA ARÁBICA L.* MEDIANTE LECHO FLUIDIZADO.

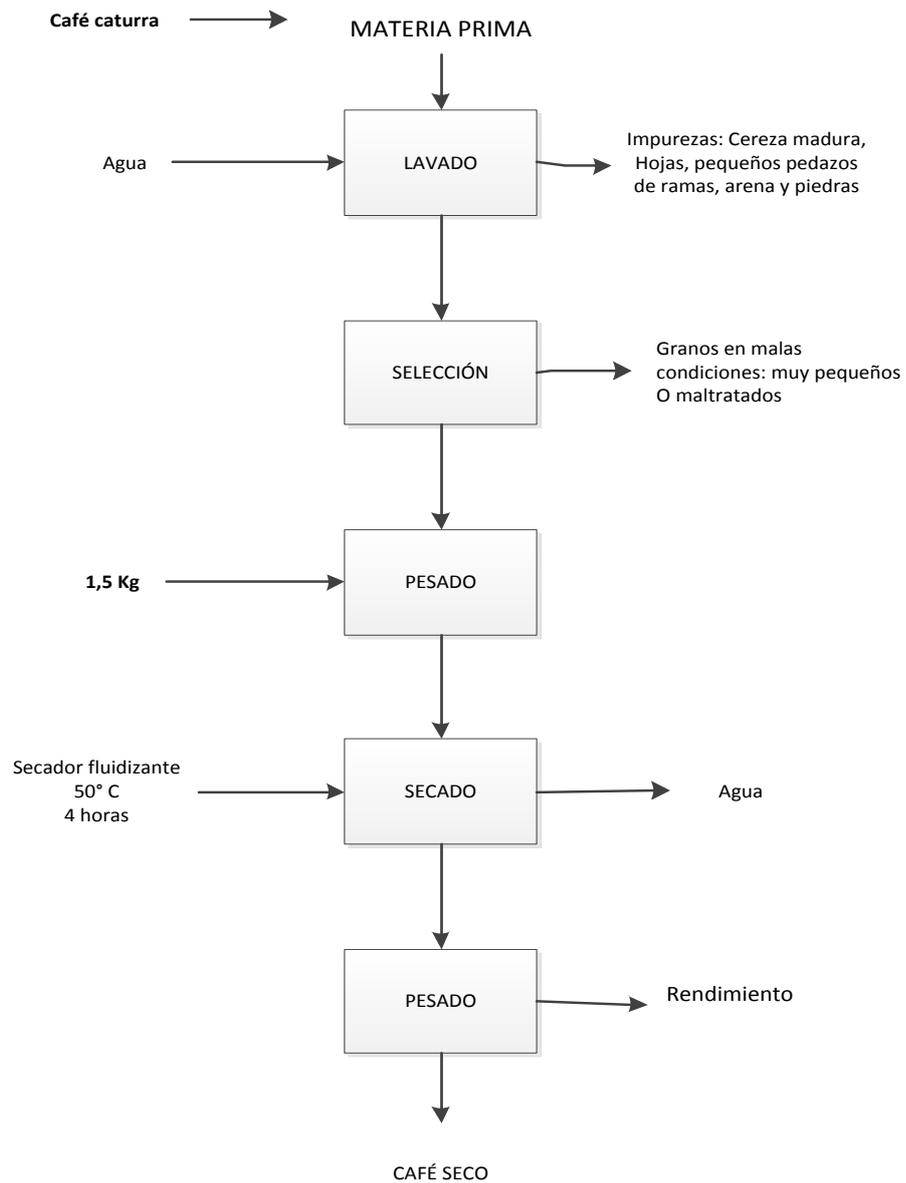


Figura 39: Diagrama del proceso de secado de café mediante lecho fluidizado.

3.5.2 DIAGRAMA DEL PROCESO DE SECADO

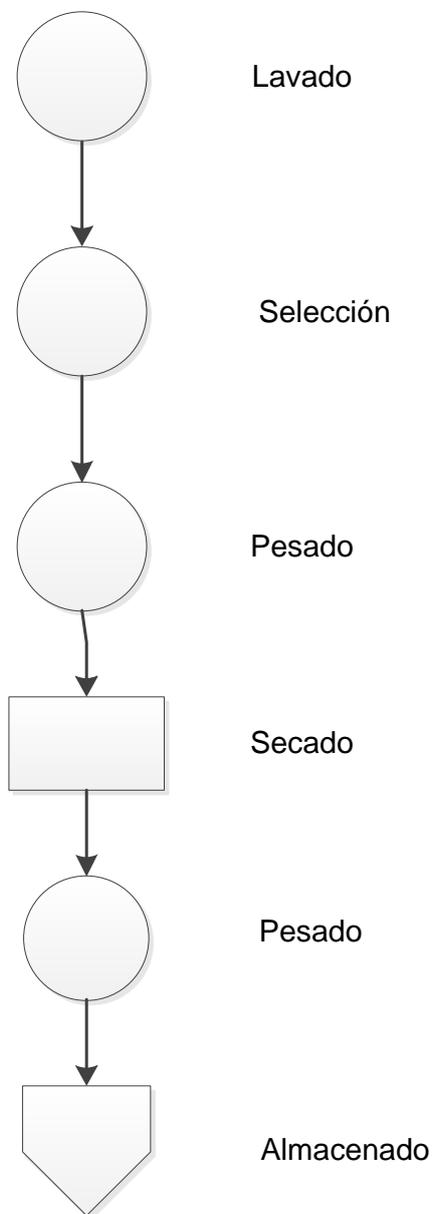


Figura 40: Diagrama de proceso de secado de café en lecho fluidizado

3.5.3 DESCRIPCIÓN DE LAS OPERACIONES DEL PROCESO DE SECADO DE CAFÉ CATURRA EN LECHO FLUIDIZADO.

A continuación se detalla cada una de las actividades que se realizaron para el proceso de secado de café.

3.5.3.1 Cosecha de las cerezas de café

Se cosechó el café en horas de la tarde para evitar que se deterioren las cerezas de café por la acción de la fermentación. El café cereza debe tener un índice de madurez “rojo intenso”



Fotografía 2: Café caturra

3.5.3.2 Recepción de la materia prima

En el centro de poscosecha, la recepción de la materia prima se la realizará de manera directa al productor, en café pergamino a diferentes humedades, manteniendo la trazabilidad desde la finca hasta el consumidor final, con información de: zona de ubicación de la finca, nombre del productor, método de beneficio, altura y variedad. Se recibió la materia prima, observando que ésta se encuentre en condiciones óptimas para llevar a cabo el experimento y se encuentre en estado fresco.



Fotografía 3: Recepción

3.5.3.3 Lavado

En este paso se utiliza agua potable en abundante cantidad para separar las impurezas tales como: pequeñas piedras, palos, ramas, hojas etc.



Fotografía 4: Lavado

3.5.3.4 Selección

Se clasifican los granos de café en mejores condiciones físicas y de tamaño uniforme.



Fotografía 5: Selección

3.5.3.5 Pesado

Se pesa la muestra utilizando una balanza analítica. Aproximadamente 6g cada muestra.



Fotografía 6: Pesado

3.5.3.6 Secado

Antes del proceso de secado se determinó las propiedades del aire que se utilizó para secar el producto el cual se analizó con la tabla psicrométrica (Anexo 3).



Fotografía 7: Proceso de secado

La operación de secado consiste en exponer los granos de café con humedades iniciales del 60-80%, al flujo de aire dentro del reactor para lecho fluidizado, controlando la temperatura y la velocidad de aire.

Se toma una muestra 1 (T_0), es decir antes de someterla al aire caliente del reactor, se procede a pesarlo y luego lo depositamos en la estufa a 100°C para determinar la humedad inicial.

Después de cierto período de tiempo retirar la muestra 1(T1) y la pesamos nuevamente para determinar el peso que ha perdido. Las muestras del reactor se las toman en lapsos de tiempo de 20 minutos, las pesamos y repetimos el procedimiento con todas las muestras sucesivamente hasta obtener un valor constante de humedad que vaya acorde con las normas establecidas para el secado de café (Norma INEN 0285; 2006, Anexo 7). Para determinar el tiempo que ha tardado en secar el producto analizamos el comportamiento cinético mediante las curvas de secado.

3.5.3.7 Café seco

El café ya seco contiene un valor de humedad de entre 10 a 12%, apto para su almacenaje. A este café seco se le realizó el análisis de actividad de agua, el cual es muy importante para determinar la vida útil del producto.



Fotografía 8: café seco

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos de la investigación “Secado de café arábigo *Coffea arábica L.* de la variedad caturra mediante lecho fluidizado”, son los siguientes.

4.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LA MATERIA PRIMA

Se realizó un estudio previo de las propiedades físicas y aerodinámicas de los granos de café para tener un control apropiado de la operación de secado. En vista de la carencia de un estudio de las propiedades físicas y aerodinámicas que pueden ser utilizadas en este tipo de granos, se utilizó café cereza para la determinación de las mismas, estas actividades se realizaron en el laboratorio de la Universidad Técnica del Norte donde se determinaron las siguientes.

Tabla 8: Resultados de las características físicas de la materia prima

Propiedad/parámetro	Resultado	Unidad
Humedad	80	%
Volumen	66	cm^3
Densidad Real:	0,76	g/cm^3
Aparente:	0,40	g/cm^3
Diámetro medio del grano	0,54	cm
Porosidad	48	%
Velocidad mínima de fluidización	2,38	m/s

Figura Ludger, (2007), menciona que las partículas pueden variar en cierta medida dentro una misma población. Por lo tanto, dependiendo del objeto de investigación, pueden ser consideradas como una forma esférica ideal, sean estas perfectas o no.

La porosidad es una propiedad física que depende de la forma y tamaño de la semilla, debido a la naturaleza coloidal y a los espacios inter granulares, el volumen del aire intersticial es del orden del 35% al 40%, esta característica permite al aire entrar y circular a través de la masa de granos.

Tabla 9: Porosidad de los granos de café

Velocidad (m/s)	Porosidad relación 0-1	Altura (cm)
0	0,48	7,3
1,6	0,48	7,5
2	0,48	8
2,4	0,49	8,5
3,1	0,52	11
4,1	0,63	13
4,7	0,71	17
5,1	0,77	18

A medida que se aumenta la velocidad del flujo de aire los granos ocupan más espacio a lo alto del lecho hasta llegar al punto de arrastre o de abandono del reactor, entonces sabremos cual es el límite de velocidad requerida antes que suceda este fenómeno.

Tabla 10: Velocidad de arrastre

v. inicial de arrastre (m/s)	12
v. final de arrastre (m/s)	12,8
Peso muestra (g)	170,54

La velocidad de arrastre de las partículas de mayor tamaño de café, sucede a una velocidad de 12,8 m/s. Para velocidades mayores a la velocidad mínima de fluidización del agente fluidizante a través del reactor se observa un aumento de la altura del lecho en función de la velocidad. (Maupoey, 2001).

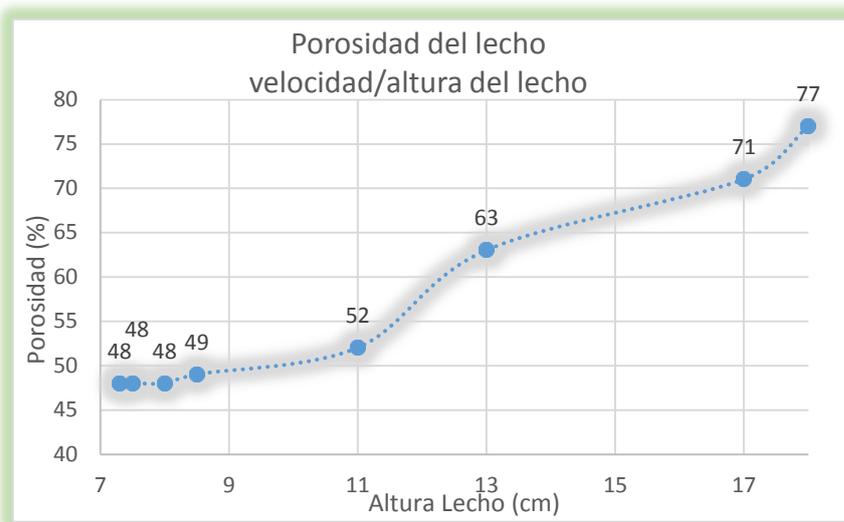


Gráfico 1: Arrastre de las partículas según la velocidad del fluido

A velocidades altas del fluido se produce el arrastre aerodinámico de las partículas, es decir que son transportadas fuera del lecho, este fenómeno se conoce como elutriación. Existe una velocidad límite más allá de la cual los granos saldrán fuera de la cámara de secado. (Jaramillo Calle, 2012)

4.1.1 VELOCIDAD MÍNIMA DE FLUIDIZACIÓN

Tabla 11: Velocidad mínima de fluidización para el café

DIÁMETRO REACTOR (cm)	ALTURA (cm)	VELOCIDAD (m/s)	VELOCIDAD MEDIA (m/s)
medio (13 cm)	1 diámetro (13cm)	2.40	2.38 m/S
medio (13 cm)	1 diámetro (13cm)	2.35	
pequeño (6 cm)	1 diámetro (6cm)	2.55	

De acuerdo a los datos de velocidad mínima de fluidización obtenidos de pruebas previas en los tres diámetros del reactor, no se evidenció diferencias significativas entre los mismos.

En el gráfico 1 se indica la curva de caída de presión versus velocidad del aire, tanto ascendente como descendente, como se muestra a continuación.

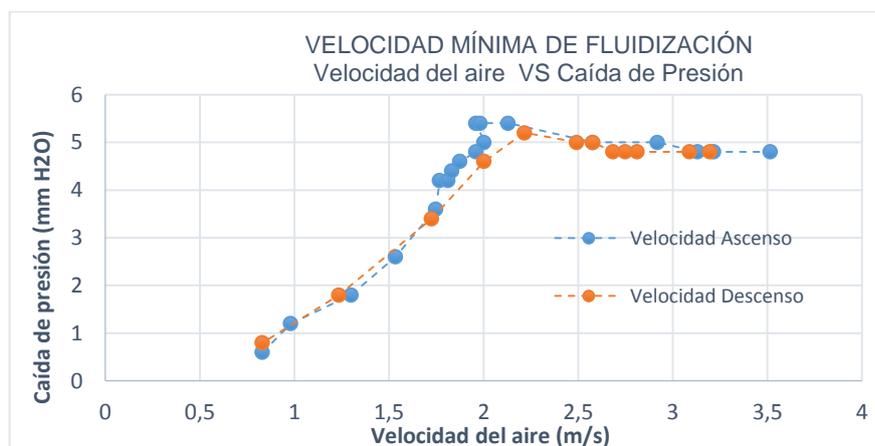


Gráfico 2: Velocidad mínima de fluidización

El gráfico 1 es un ejemplo de la velocidad mínima de fluidización en café arábigo, donde se ilustra los datos obtenidos de la medición de la velocidad del aire versus la caída de presión, determinándose una velocidad media constante de 2.38 m/s para lograr fluidizar los granos de café. Sin embargo en el desarrollo de la investigación se utilizaron velocidades superiores para observar su comportamiento en el tiempo.

4.2 ANÁLISIS DE VARIABLES CUANTITATIVAS

Las variables evaluadas fueron la humedad, tiempo de secado, curvas de secado. Se realizó el análisis estadístico de los valores de tiempo de secado, desde un contenido de humedad de los granos de 60% hasta una humedad final de 12% en base seca, donde se evaluó los efectos de los parámetros del proceso como son la velocidad del aire y la temperatura de secado.

4.2.1 TIEMPO

Se determinó el tiempo que tarda en pasar de un valor fijo de humedad a otro, o en cualquier momento, para cada tratamiento, donde se obtuvieron los siguientes resultados:

En la tabla 10 se indican los valores de tiempo de secado en TAU minutos en función de la velocidad del aire y la temperatura del aire seco.

Tabla 12: Tiempo de secado del café expresado en TAU (min)

Tratamientos	R1	R2	R3	Sumatoria	Media
A1B1	300	295	305	900	300
A1B2	170	165	178	513	171
A1B3	185	180	186	551	184
A2B1	280	285	290	855	285
A2B2	135	138	132	405	135
A2B3	130	136	140	406	135
A3B1	240	230	240	710	237
A3B2	120	125	128	373	124
A3B3	50	48	55	153	51

Sumatoria Total: 4866, Media: 180

El tiempo mínimo de secado establecido es de 50 minutos, que corresponde a una velocidad del aire de 5,5 m/s a una temperatura de 50° C.

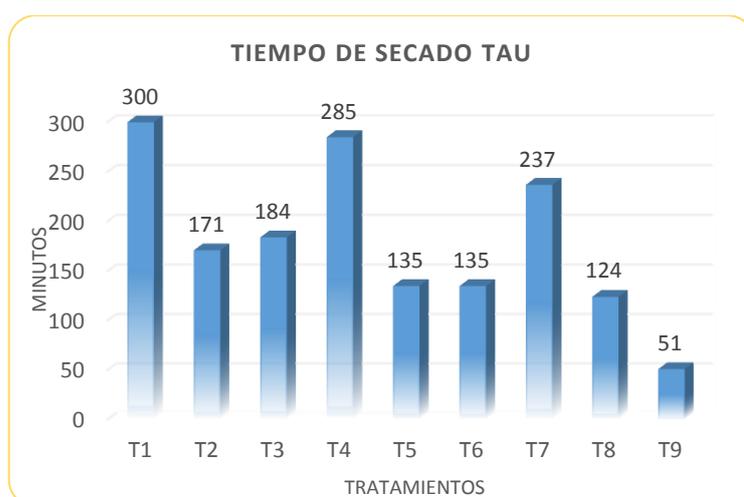


Gráfico 3: Tiempos de secado en TAU

En el gráfico 1 se analizan los tiempo de secado como tiempo TAU, obtenidos de “MR” de las curvas de secado, los cuales son valores adimensionales que nos permiten ajustar de mejor manera las diferencias de cierto tramo en dichas curvas, de los tratamientos, desde una humedad fija de 60% hasta una humedad final del 12%.

Sin embargo, en el gráfico 1 se observa que los tratamientos T1, T2 y T3 presentan mayores tiempos medios de secado, de 300, 285 y 237 minutos TAU respectivamente, con relación a los demás tratamientos evaluados. Este comportamiento tardío de mayor tiempo de secado, se debe posiblemente al efecto determinante de la velocidad del aire de secado, tal como se puede observar en el diagrama de Pareto (gráfico 2).

Tabla 13: Resultados para el Análisis de Varianza de la variable tiempo de secado

F.V	SC	GL	CM	F. cal	F. Tab 5%	F. Tab 1%
Total	157871	26				
Trat.	157470	8	19684	895 **	3	4
FA	29767	2	14884	677 **	4	6
FB	120262	2	60131	2733 **	4	6
IAB	7441	4	1860		3	5
Error	401	18	22			

CV: 3%

El análisis de varianza del tiempo de secado en lecho fluidizado, presentó diferencias estadísticas altamente significativas ($p < 0,01$), tanto para tratamientos como ara factores, donde el factor A es temperatura de secado y factor B velocidad del aire. Mientras la interacción AB no presento diferencia estadística significativa ($p < 0,05$). Además este análisis presento un coeficiente de variación de 3%.

El análisis de Tukey a los tratamientos estableció que el tratamiento T9 (50° C + 5,5 m/s) presento menor tiempo de secado de 51 minutos con relación a los demás tratamientos que presentan entre 124 y 300 minutos de tiempo de secado, como se observa en la tabla 12.

Tabla 14: Prueba de Tukey para tratamientos

Tratamientos	Medias	Tukey
T1	300	a
T2	285	a
T3	236,67	b
T4	183,67	c
T5	171	c d
T6	135,33	d e
T7	135	d e
T8	124,33	e f
T9	51	g

Según los rangos de la prueba de Tukey ($\alpha < 0,05$) determinaron el orden de los mismos donde g corresponde al menor tiempo de secado, es decir es el mejor tratamiento.

Tabla 15: Prueba DMS para el factor A (Temperatura) de la variable tiempo

Factores	Medias	DMS
A1	218	a
A2	185	b
A3	137	c

El análisis funcional de los tiempos medios de secado del factor A (temperatura de secado), mediante la prueba de diferencia media significativa (DMS al $\alpha < 0,05$), determinó el orden de los rangos, donde “c” corresponden al nivel del factor de mayor efecto sobre el tiempo de secado, que permite secar los granos a menor tiempo de 137 minutos.

Tabla 16: Prueba DMS para el factor B (velocidad del aire) de la variable tiempo

Factores	Medias	DMS
B1	274	a
B2	143	b
B3	123	c

El análisis funcional de los tiempos medios de secado del factor B (velocidad del aire), mediante la prueba de diferencia media significativa (DMS al $\alpha < 0,05$), determinó el orden de los rangos, donde “c” corresponden al nivel del factor de mayor efecto sobre el tiempo de secado, que permite secar los granos a menor tiempo de 123 minutos.

4.2.1.1 Diagrama de Pareto

El análisis estadístico de Pareto permite determinar los factores de mayor efecto sobre el tiempo de secado, donde se observa que la velocidad del aire presenta un mayor efecto con relación a la temperatura, según se observa en el gráfico 4

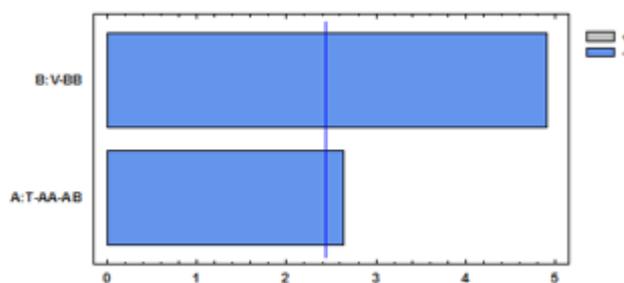


Gráfico 4: Diagrama de Pareto

En el trabajo Fontal, (2012), se determinaron valores de tiempo de secado entre 6 y 8 horas en un reactor de 5000 gramos de café a 46 y 49 ° C de temperatura. Sin embargo, no se indica la velocidad del aire utilizada, la cual es muy importante en el proceso de secado fluidizado de café.

Mientras, (Montilla et al., 2013), reporta un tiempo de secado de 18 horas en lecho fijo bajo un régimen de temperatura de 50 ° C, lo cual coincide con los datos experimentales obtenidos en esta investigación, donde el tiempo de secado es mucho menor utilizando la fluidización a la misma temperatura, presentando tiempos de secado mínimos de unas 4 horas.

4.2.2 CINÉTICA DE SECADO

Después de acondicionar los granos de café, se someten a secado por lecho fluidizado, esquematizado en la fotografía 1, del laboratorio de Ingeniería Mecatrónica de la Universidad Técnica del Norte. La columna o reactor está fabricado de acrílico (13 cm de diámetro y 100 cm de altura). Los granos de café cereza fueron sometidos a 3 temperaturas (40; 45; 50° C) y 3 niveles de velocidad del aire (3,9; 4,7; 5,5 m/s). La temperatura de bulbo seco y la velocidad del aire fueron monitoreadas durante todo el tiempo de secado con el termo- anemómetro (TSI Inc. 8330, USA, precisión de +- 0,1 m/s). (Flores & de Jesús, 2011)

La velocidad del aire de secado para todas las condiciones de secado, fue utilizada de acuerdo a Gazor y Mohsenimanesh (2010), ya que una buena fluidización es obtenida cuando el lecho del material a secar muestra una mezcla perfecta.

Antes de presentar los datos experimentales se hace un análisis de los Modelos matemáticos más utilizados para la descripción del proceso de secado de granos y alimentos en general.

Tabla 17: Modelos más utilizados en los procesos de secado de granos

Modelo	Ecuación
Newton	$MR = \exp(-kt)$
Page Modificado	$MR = \exp(-kt^n)$
Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$
logarítmico	$MR = a \exp(-kt) + c$
Wang and Singh	$MR = at^2 + bt + 1$
Thompson	$t = a[\ln(MR)]^2 + b\ln(MR)$

Estos modelos son utilizados en general para describir tanto la etapa de velocidad constante de secado como la etapa de velocidad decreciente de secado, destacándose los modelos de Page Modificado y Wang and Singh para el modelado de velocidades decrecientes de la velocidad del secado. Donde la razón

de humedad (MR), que se utiliza en este trabajo, es un contenido de humedad adimensional y se puede calcular de acuerdo a:

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_o - M_e} \quad (46)$$

Donde M_o , M_t y M_e son el contenido de humedad inicial, en cualquier momento (t) y en el equilibrio respectivamente. El contenido de humedad en el equilibrio (M_e) es extremadamente pequeño comparado con el contenido de humedad inicial (M_o) y en cualquier momento (M_t), por lo que se puede omitir de la ecuación anterior (Shi & Xue, 2009).

De acuerdo al valor despreciable de la humedad de equilibrio el cálculo de MR se realiza por la siguiente expresión:

$$MR = \frac{M_t}{M_o} \quad (47)$$

Entonces, para el procesamiento de datos de cada curva de secado en función del tiempo, se utilizó la razón de humedad experimental MR respecto al tiempo.

El procesamiento de datos se realizó para tres niveles de velocidad del aire (3,9, 4,7, 5,5 m/s) y tres valores de temperatura, 40, 45, 50 ° C.

4.2.2.1 Tratamiento T1

En este tratamiento los granos de café caturra rojo previamente tratados y con una humedad del 70% (base húmeda), se sometieron a un proceso de secado fluidizante en un reactor de 13 cm de diámetro y 100 cm de altura, a una temperatura de 40°C y una velocidad del aire de 3,9 m/s, según se observa en la tabla 16. El área se calculó de acuerdo a las medidas del cilindro o reactor como se indica en el anexo 4

Tabla 18: Condiciones de secado T1

Temperatura (° C)	Velocidad del aire (m/s)	Humedad inicial (%)	Área (m ²)
40	3,9	70	0,43

Se procedió a introducir muestras de 0,5 kg para cada corrida bajo las condiciones de cada tratamiento. Las muestras para la determinación de la humedad se tomaron cada 20 minutos al inicio del proceso, y cada 60 minutos en la etapa de velocidad decreciente. El proceso de secado mediante condiciones controladas de acuerdo al tratamiento T1, tuvo una duración 5,83 horas, hasta llegar a la humedad de equilibrio.

Tabla 19: Comportamiento de la humedad y velocidad de secado T1

tiempo (horas)	Peso (g)	Peso bs kg (ss)	Humedad kg H ₂ O/kgss	humedad media media \bar{X}	velocidad de secado kgH ₂ O/h m ²
0	3,74	2,64	2,4		
0,33	3,65	2,33	1,77	2,084	11,72
0,67	3,48	1,86	1,15	1,461	5,01
1	3,48	1,62	0,87	1,01	1,21
1,67	3,63	1,31	0,56	0,714	0,70
2,83	3,88	1,22	0,46	0,511	0,11
3,33	3,37	0,93	0,38	0,42	0,07
3,83	3,5	1,03	0,42	0,399	0,02
4,33	3,24	0,87	0,37	0,392	0,03
4,83	2,65	0,63	0,31	0,34	0,03
5,33	3,38	0,4	0,14	0,225	0,05
5,83	2,75	0,16	0,06	0,098	0,01

4.2.2.1.1 Curva de secado T1

En el gráfico 5 se muestra la curva de secado para T1 en el cual se trabajó con valores de temperatura de 40° C y velocidad del aire de 3,9 m/s. La humedad de ingreso de la materia prima es de aproximadamente 70% bh.

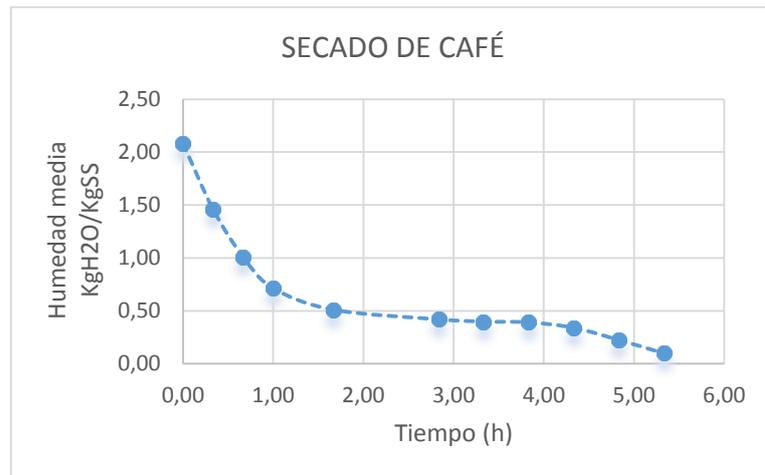


Gráfico 5: Curva de secado T1

En el gráfico 5 se indica la curva de secado para T1, donde se aprecia los periodos de secado. El precalentamiento fue muy corto por lo que no se puede distinguir en el gráfico, Ibarz & Barbosa Cánovas (2014) mencionan que en cálculos de secado es posible despreciar la etapa de precalentamiento.

La primera etapa de este proceso, la operación de secado es gobernada por el mecanismo de transporte de masa de flujo capilar, debido a que la estructura celular está intacta, el agua se desplaza a través de los capilares hacia la superficie donde es eliminada a velocidad constante (Chakraverty, 2014). El periodo de velocidad constante es de aproximadamente 0,67 horas.

4.2.2.1.2 Tiempo TAU T1

Los cambios de humedad adimensional “MR” experimental en función del tiempo de secado de los granos de café, son presentados en el gráfico 6.

Para permitir un mejor análisis y comparación entre los tratamientos, se utiliza la razón de humedad “MR” para el trazado de las curvas que utiliza como referencia dos puntos. Para todos los casos, la humedad va desde un valor de 60% hasta 12%, el cual tarda un determinado tiempo y se lo conoce como “tiempo TAU” como se identifica a continuación.

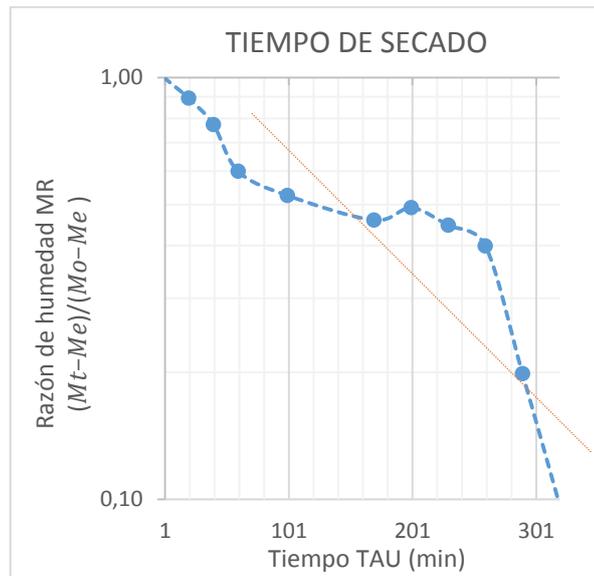


Gráfico 6: Curva de secado TAU para T1

El gráfico 6 muestra una curva semi-logarítmica para la Razón de Humedad “MR”, que nos permiten analizar el tiempo de secado establecido por TAU en función de la velocidad y la temperatura utilizadas. Este artificio matemático se utiliza para evaluar un rango fijo de humedad debido a la presentación de la materia prima al ingreso al secador, la cual contiene la capa más externa del grano de café y evita que la operación se estabilice, impidiendo la toma de datos reales de humedad y por lo tanto el cálculo del tiempo de secado.

El tiempo necesario para disminuir la humedad, desde 60%, hasta la humedad de equilibrio fue de 300 minutos. La relación de humedad se reduce de forma exponencial con el tiempo de secado, este comportamiento es típico de los materiales biológicos. (Flores & de Jesús, 2011)

4.2.2.1.3 Curva de Velocidad de secado T1

En los cálculos de la cinética del proceso de secado, el contenido de humedad se expresa en base seca es decir en función de los sólidos de la muestra ($\text{Kg H}_2\text{O/Kg sólidos secos}$ y la velocidad de secado en $\text{KgH}_2\text{O/hm}^2$ - área), con la finalidad de facilitar los cálculos respectivos. Obsérvese tabla 17.

En el gráfico 7, los periodos de velocidad de secado están diferenciados entre el periodo de velocidad constante y el periodo de velocidad decreciente. Durante el primer periodo el secado se efectúa a velocidad constante, este periodo se mantiene hasta que la superficie del producto se encuentra alimentada por agua libre desde el interior, fundamentalmente por capilaridad, el diámetro de los poros y los capilares disminuyen a medida que se elimina más cantidad de agua. (Scribd, 2016)

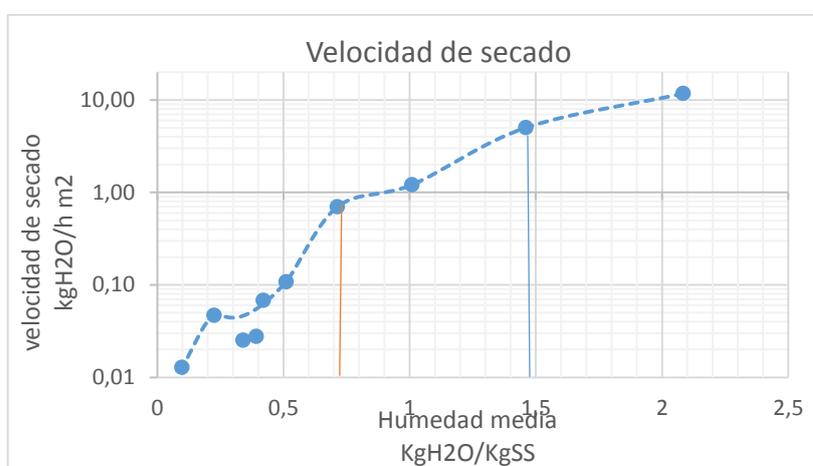


Gráfico 7: Velocidad de secado T1

En el periodo de velocidad decreciente se observa tres puntos de inflexión en la curva de secado, donde el movimiento de agua que se genera en el interior del producto y sale hacia la superficie, se ve afectado al momento de la toma de datos. Los elementos estructurales del producto sufren mayores deformaciones provocando el encogimiento del producto lo cual reduce los espacios libres y el agua empieza a desplazarse por el mecanismo de difusión. (Colina, Irezabal, 2010)

El periodo de velocidad decreciente de secado tuvo una duración de 1,00 horas, durante este periodo la evaporación de agua se efectúa en el interior del producto y lo hace de manera lenta, desde el contenido de humedad inicial $X_0 = 2,40$ $\text{kgH}_2\text{O}/\text{kgss}$, formando una pendiente hasta la humedad crítica $X_c = 0,71$ $\text{kgH}_2\text{O}/\text{kgss}$ y una velocidad crítica $W_c = 0,80$ $\text{kgH}_2\text{O}/\text{hm}^2$.

La cinética de secado mostró que el secado de los granos de café, ocurre principalmente en el periodo de velocidad decreciente. La superficie del material ya no está con agua y la velocidad de secado está controlado por el fenómeno de difusión interna de acuerdo con el proceso de control de transferencia de masa. (Flores & de Jesús, 2011)

4.2.2.2 Tratamiento T2

En este tratamiento los granos de café caturra rojo previamente tratados y con una humedad del 87% b.h., se sometieron a un proceso de secado fluidizante en un reactor de 13 cm de diámetro y 100 cm de altura, a una temperatura de 40°C y una velocidad del aire de 4,7 m/s, tabla 17.

Tabla 20: Condiciones de secado T2

Temperatura (° C)	Velocidad del aire (m/s)	Humedad inicial (%)	Área (m ²)
40	4,7	87	0,43

Se procedió a introducir muestras de 0,5 kg para cada corrida bajo las condiciones de cada tratamiento. Las muestras para la determinación de la humedad se tomaron cada 20 minutos al inicio del proceso, y cada 60 minutos en la etapa de velocidad decreciente. El proceso de secado mediante condiciones controladas de acuerdo al tratamiento T2, tuvo una duración 6,00 horas, hasta llegar a la humedad de equilibrio, Tabla 18.

Tabla 21: Comportamiento de la humedad y velocidad de secado T2

tiempo	Peso	peso bs	Humedad	humedad media	velocidad de secado
(horas)	(g)	kg (ss)	kg H ₂ O/kgss	media \bar{X}	kgH ₂ O/h m ²
0,00	5,31	4,66	7,21		
0,25	4,91	3,50	2,47	4,84	205,51
0,50	2,70	1,69	1,67	2,07	12,99
1,00	3,48	1,93	1,24	1,45	1,70
1,50	4,64	1,93	0,71	0,97	1,57
3,00	3,30	1,09	0,50	0,60	0,32
5,00	3,64	0,79	0,28	0,39	0,11
6,00	3,70	0,44	0,14	0,21	0,04

4.2.2.2.1 Curva de secado

El grafico 8 indica la curva para el experimento 2 en el cual se trabajó con valores de temperatura de 40° C a una velocidad del aire de 4,7 m/s. La humedad de ingreso de la materia prima es de aproximadamente 87% b.h.

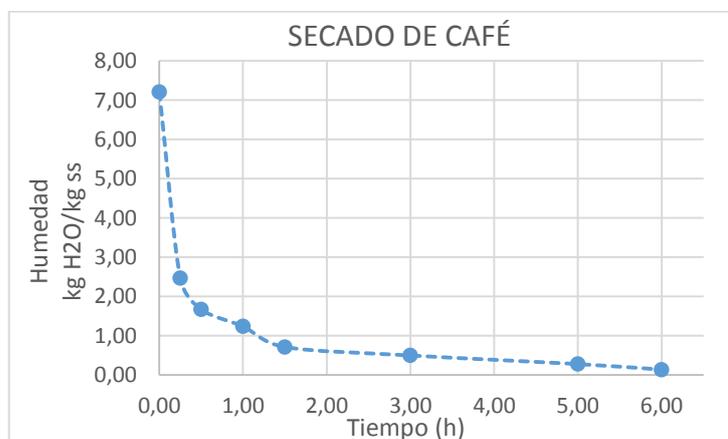


Gráfico 8: Curva de secado T2

En el grafico 8 se indica la curva de secado para el tratamiento T2, donde se aprecia los periodos de secado, el precalentamiento fue muy corto por lo que no se puede distinguir en el gráfico, Ibarz & Barbosa Cánovas (2014) mencionan que en cálculos de secado es posible despreciar la etapa de precalentamiento.

Durante este proceso, la operación de secado es gobernada por el mecanismo de transporte de masa de flujo capilar, debido a que la estructura celular está intacta, el agua se desplaza a través de los capilares hacia la superficie donde es eliminada a velocidad constante. El periodo de velocidad constante es de aproximadamente 0,25 horas.

4.2.2.2 Tiempo TAU para T2

Para permitir un mejor análisis y comparación entre los tratamientos, se utiliza “MR”, una herramienta muy útil de trazado de las curvas que utiliza como referencia dos puntos fijos y a la vez claves, donde la humedad va desde un valor de 60 % hasta un 12%, el cual tarda un determinado tiempo y se lo conoce como “tiempo TAU”, como se identifica a continuación.

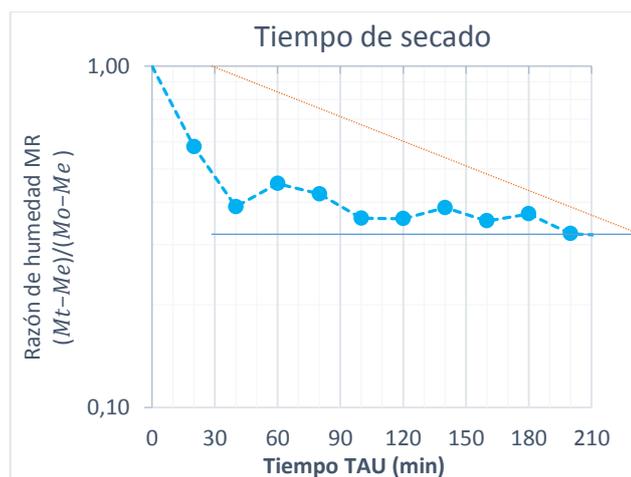


Gráfico 9: Curva de secado TAU para T2

El gráfico 9 muestra una curva semi-logarítmica para la Razón de Humedad “MR”, que nos permiten analizar el tiempo de secado establecido por TAU en función de la velocidad y la temperatura utilizadas. Este artificio matemático se utiliza para evaluar un rango fijo de humedad debido a la presentación de la materia prima al ingreso al secador, la cual contiene la capa más externa del grano de café y evita que la operación se estabilice impidiendo la toma de datos reales de humedad y por lo tanto el cálculo del tiempo de secado.

El tiempo necesario para disminuir la humedad, desde 60% b.s, hasta la humedad de equilibrio fue de 200 minutos. La relación de humedad se reduce de forma exponencial con el tiempo de secado, este comportamiento es típico de los materiales biológicos. (Flores & de Jesús, 2011)

4.2.2.2.3 Velocidad de secado T2

En el gráfico 10, los periodos de velocidad de secado están diferenciados entre el periodo de velocidad constante y el periodo de velocidad decreciente. Durante el periodo de velocidad constante la evaporación se efectúa de manera constante, este periodo se mantiene hasta que la superficie del producto se encuentre alimentada por agua libre desde el interior fundamentalmente por capilaridad, el diámetro de los poros y los capilares disminuyen a medida que se elimina más cantidad de agua.

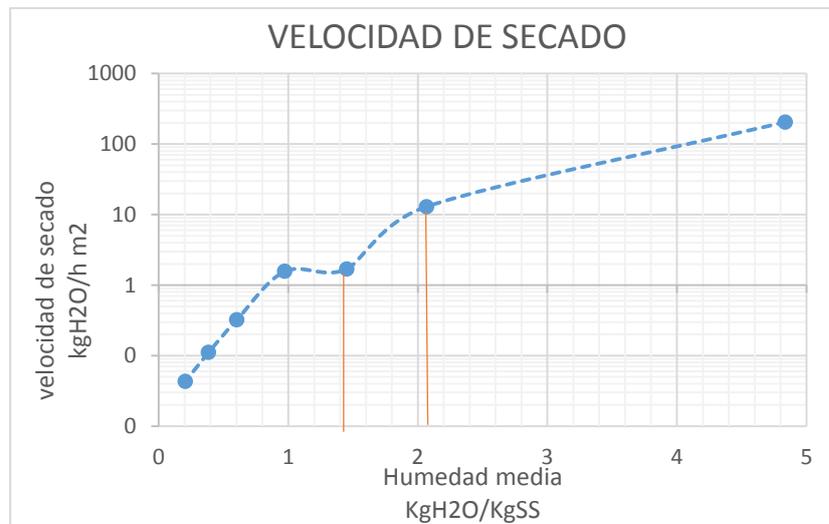


Gráfico 10: Velocidad de secado T2

En el periodo de velocidad decreciente se observa tres puntos de inflexión en la curva de secado, donde el movimiento de agua que se genera en el interior del producto y sale hacia la superficie, se ve afectado al momento de la toma de datos, los elementos estructurales del producto sufren mayores deformaciones provocando el encogimiento del producto lo cual reduce los espacios libres y el

agua empieza a desplazarse por difusión. (Colina, Irezabal, 2010). Las curvas de velocidad de secado, se utilizaron para evaluar qué tipo de mecanismo se lleva a cabo durante el secado (Doymaz, 2008; Rafiee y col, 2009), de los granos de café caturra.

El periodo de velocidad decreciente de secado tuvo una duración de 1,50 horas, durante este periodo la evaporación de agua se efectúa en el interior del producto, desde el contenido de humedad inicial $X_0 = 7,21 \text{ kgH}_2\text{O/kgss}$, formando una pendiente hasta la humedad crítica $X_c = 0,71 \text{ kgH}_2\text{O/kgss}$ y una velocidad crítica $R_c = 1,70 \text{ kgH}_2\text{O/hm}^2$.

4.2.2.3 Tratamiento T3

En este tratamiento los granos de café caturra rojo previamente tratados y con una humedad del 82% b.h., se sometieron a un proceso de secado fluidizante en un reactor de 13 cm de diámetro y 100 cm de altura, a una temperatura de 40°C y una velocidad del aire de 5,5 m/s, según se observa en la tabla 19.

Tabla 22: Condiciones de secado T3

Temperatura (° C)	Velocidad del aire (m/s)	Humedad inicial (%)	Área (m ²)
40	5,5	82	0,43

Se procedió a introducir muestras de 0,5 kg para cada corrida bajo las condiciones de cada tratamiento. Las muestras para la determinación de la humedad se tomaron cada 20 minutos al inicio del proceso, y cada 60 minutos en la etapa de velocidad decreciente. En proceso de secado mediante condiciones controladas de acuerdo al tratamiento T3, el proceso de secado tuvo una duración 3,83 horas, hasta llegar a la humedad de equilibrio.

Tabla 23: Comportamiento de la humedad y velocidad de secado T3

tiempo	Peso	peso bs	Humedad	humedad media	velocidad de secado
(horas)	(g)	kg (ss)	kg H2O/kgss	media \bar{X}	kgH2O/h m2
0,00	5,02	5,74	7,93		
0,33	3,56	2,93	4,64	6,28	8,75
1,67	3,71	1,96	1,12	2,88	6,74
2,00	3,40	1,29	0,61	0,87	0,62
2,33	2,99	0,98	0,49	0,55	0,11
2,83	3,39	0,75	0,29	0,39	0,16
3,33	2,74	0,68	0,33	0,31	0,02
3,83	3,20	0,40	0,14	0,23	0,11

4.2.2.3.1 Curva de secado T3

El grafico 11 indica la curva para el experimento 2 en el cual se trabajó con valores de temperatura de 40° C a una velocidad del aire de 4,7 m/s. La humedad de ingreso de la materia prima es de aproximadamente 87% bh..

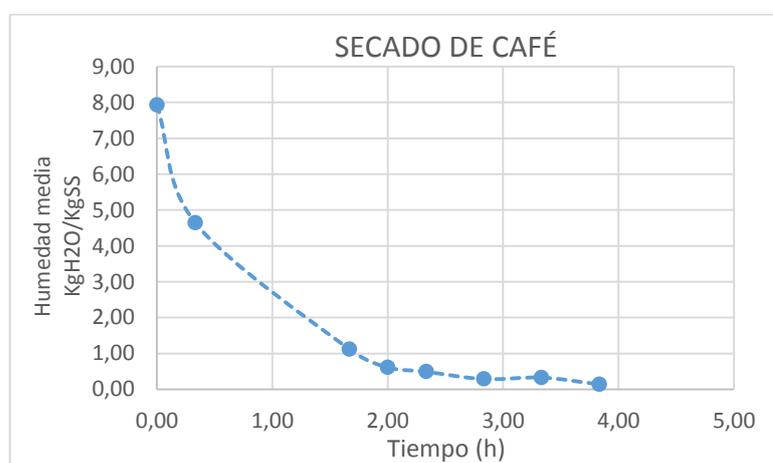


Gráfico 11: Curva de secado T3

En el grafico 11 se indica la curva de secado para el tratamiento T3, donde se aprecia los periodos de secado, el precalentamiento fue muy corto por lo que no se puede distinguir en el gráfico, Ibarz & Barbosa Cánovas (2014) mencionan que en cálculos de secado es posible despreciar la etapa de precalentamiento.

Durante este proceso, la operación de secado es gobernada por el mecanismo de transporte de masa de flujo capilar, debido a que la estructura celular está intacta, el agua se desplaza a través de los capilares hacia la superficie donde es eliminada a velocidad constante. El periodo de velocidad constante es de aproximadamente 2,00 horas.

4.2.2.3.2 Tiempo de secado TAU para T3

Para permitir un mejor análisis y comparación entre los tratamientos, se utiliza una herramienta muy útil de trazado de las curvas que utiliza como referencia dos puntos fijos y a la vez claves, donde la humedad va desde un valor de 60 % hasta un 12%, el cual tarda un determinado tiempo y se lo conoce como tiempo “TAU” como se identifica a continuación.



Gráfico 12: Curva de secado TAU para T3

En el gráfico 12 se utiliza un logaritmo base 10 para la Razón de Humedad, que nos permiten analizar el tiempo de secado establecido por TAU en función de la velocidad y la temperatura utilizadas. Este artificio matemático se utiliza para evaluar un rango fijo de humedad debido a la presentación de la materia prima al ingreso al secador, la cual contiene la capa más externa del grano de café y evita que la operación de secado se establezca impidiendo la toma de datos reales de

humedad y por lo tanto el cálculo del tiempo de secado. El tiempo TAU para este tramo de la curva es de unos 180 minutos, requeridos para alcanzar el valor de 12% de humedad en el producto final.

4.2.2.3.3 Velocidad de secado T3

En el gráfico 13, los periodos de velocidad de secado están diferenciados entre el periodo de velocidad constante y el periodo de velocidad decreciente. Durante el periodo de velocidad constante la evaporación se efectúa de manera constante, este periodo se mantiene hasta que la superficie del producto se encuentre alimentada por agua libre desde el interior fundamentalmente por capilaridad, el diámetro de los poros y los capilares disminuyen a medida que se elimina más cantidad de agua.

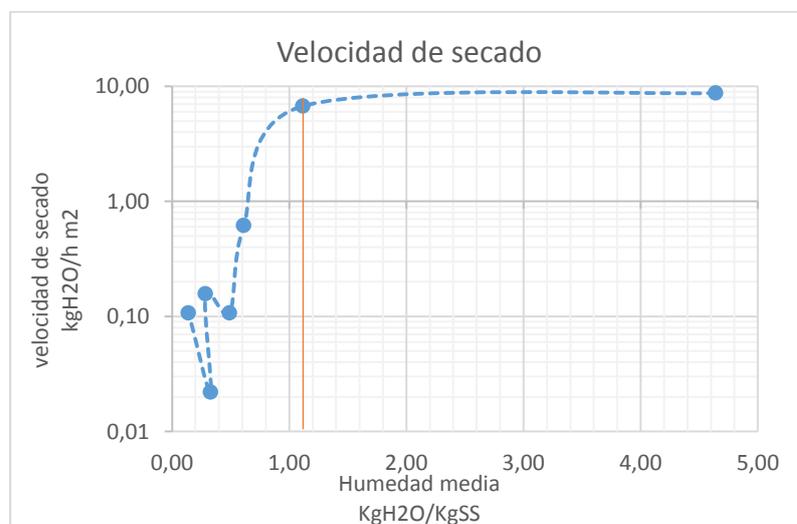


Gráfico 13: Velocidad de secado T3

En el periodo de velocidad decreciente se observa tres puntos de inflexión en la curva de secado, donde el movimiento de agua que se genera en el interior del producto y sale hacia la superficie, se ve afectado al momento de la toma de datos, los elementos estructurales del producto sufren mayores deformaciones

provocando el encogimiento del producto lo cual reduce los espacios libres y el agua empieza a desplazarse por difusión. (Colina, Irezabal, 2010)

El periodo de velocidad decreciente de secado tuvo una duración de 2,00 horas, durante este periodo la evaporación de agua se efectúa en el interior del producto y lo hace de manera descendente, desde el contenido de humedad inicial $X_0 = 7,93$ kgH₂O/kgss, formando una pendiente hasta la humedad crítica $X_c = 0,84$ kgH₂O/kgss y una velocidad crítica $R_c = 5,59$ kgH₂O/hm².

En las curvas no aparecen periodos de velocidad constante, por lo que el secado se produce por completo en el periodo de velocidad decreciente. Este comportamiento confirma que el mecanismo de transferencia de masa se lleva a cabo mediante difusión. Los resultados obtenidos en las cinéticas de secado y en las curvas de velocidad de secado podrían ser útiles para el diseño y escalamiento de equipos de secado. (Flores & de Jesús 2010)

4.2.2.4 Tratamiento T4

En este tratamiento los granos de café caturra rojo previamente tratados y con una humedad del 94% b.h., se sometieron a un proceso de secado fluidizante en un reactor de 13 cm de diámetro y 100 cm de altura, a una temperatura de 45°C y una velocidad del aire de 3,9 m/s, según se observa en la tabla 21.

Tabla 24: Condiciones de secado T4

Temperatura (° C)	Velocidad del aire (m/s)	Humedad inicial (%)	Área (m ²)
45	3,9	94	0,43

Se procedió a introducir muestras de 0,5 kg para cada corrida bajo las condiciones de cada tratamiento. Las muestras para la determinación de la humedad se tomaron cada 20 minutos al inicio del proceso, y cada 60 minutos en la etapa de

velocidad decreciente. En proceso de secado mediante condiciones controladas de acuerdo al tratamiento T4, el proceso de secado tuvo una duración 3,33 horas hasta llegar a la humedad de equilibrio.

Tabla 25: Comportamiento de humedad y velocidad de secado T4

tiempo	Peso	peso bs	Humedad	humedad media	velocidad de secado
(horas)	(g)	kg (ss)	kg H2O/kgss	media \bar{X}	kgH2O/h m ²
0,00	4,46	4,23	18,05		
0,33	3,45	1,71	0,99	9,52	503,06
0,67	3,54	1,21	0,52	0,75	2,79
1,33	3,07	0,86	0,39	0,45	0,29
1,83	2,79	0,55	0,25	0,32	0,15
2,33	2,80	0,46	0,20	0,22	0,03
2,83	2,41	0,35	0,17	0,18	0,01
3,33	3,10	0,33	0,12	0,14	0,01

4.2.2.4.1 Curva de secado T4

El gráfico 14 indica la curva para el experimento 2 en el cual se trabajó con valores de temperatura de 45° C a una velocidad del aire de 4,7 m/s. La humedad de ingreso de la materia prima es de aproximadamente 94% bh.

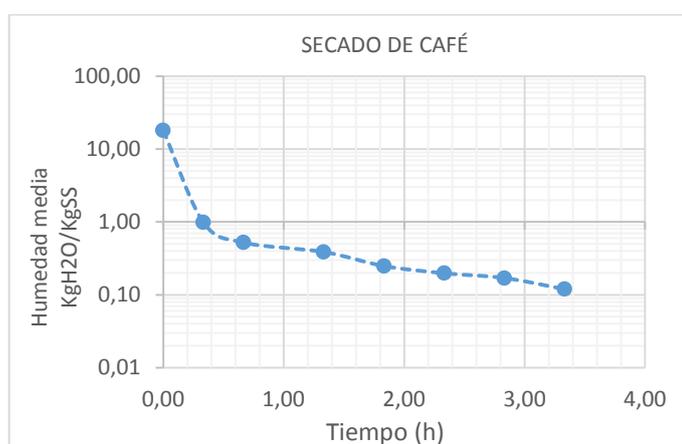


Gráfico 14: Curva de secado T4

En el gráfico 14 se indica la curva de secado para el tratamiento T4, donde se aprecia los periodos de secado, el precalentamiento fue muy corto por lo que no se puede distinguir en el gráfico, Ibarz & Barbosa Cánovas (2014) mencionan que en cálculos de secado es posible despreciar la etapa de precalentamiento.

Durante este proceso, la operación de secado es gobernada por el mecanismo de transporte de masa de flujo capilar, debido a que la estructura celular está intacta, el agua se desplaza a través de los capilares hacia la superficie donde es eliminada a velocidad constante. El periodo de velocidad constante es de aproximadamente 0,67 horas.

4.2.2.4.2 Tiempo de secado TAU para T4

Para permitir un mejor análisis y comparación entre los tratamientos, se utiliza una herramienta muy útil de trazado de las curvas que utiliza como referencia dos puntos fijos y a la vez claves, donde la humedad va desde un valor de 60 % hasta un 12%, el cual tarda un determinado tiempo y se lo conoce como tiempo “TAU” como se identifica a continuación.

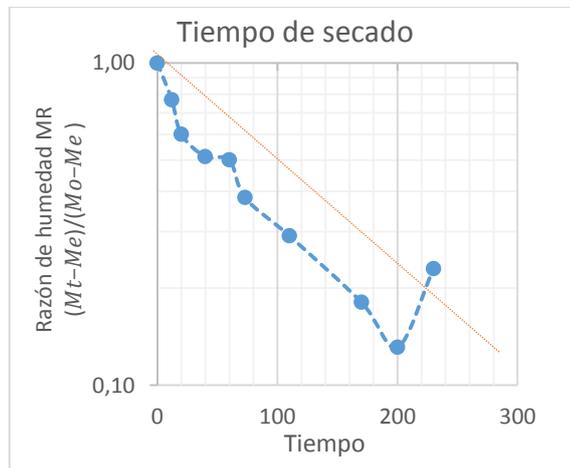


Gráfico 15: Curva de secado TAU para T4

En el gráfico 15 se utiliza un logaritmo base 10 para la Razón de Humedad, que nos permiten analizar el tiempo de secado establecido por TAU en función de la

velocidad y la temperatura utilizadas. Este artificio matemático se utiliza para evaluar un rango fijo de humedad debido a la presentación de la materia prima al ingreso al secador, la cual contiene la capa más externa del grano de café y evita que la operación de secado se estabilice impidiendo la toma de datos reales de humedad y por lo tanto el cálculo del tiempo de secado. El tiempo TAU para este tramo de la curva es de unos 230 minutos, requeridos para alcanzar el valor de 12% de humedad en el producto final.

4.2.2.4.3 Velocidad de secado para T4

En el gráfico 16, los periodos de velocidad de secado están diferenciados entre el periodo de velocidad constante y el periodo de velocidad decreciente. Durante el periodo de velocidad constante la evaporación se efectúa de manera constante, este periodo se mantiene hasta que la superficie del producto se encuentre alimentada por agua libre desde el interior fundamentalmente por capilaridad, el diámetro de los poros y los capilares disminuyen a medida que se elimina más cantidad de agua.

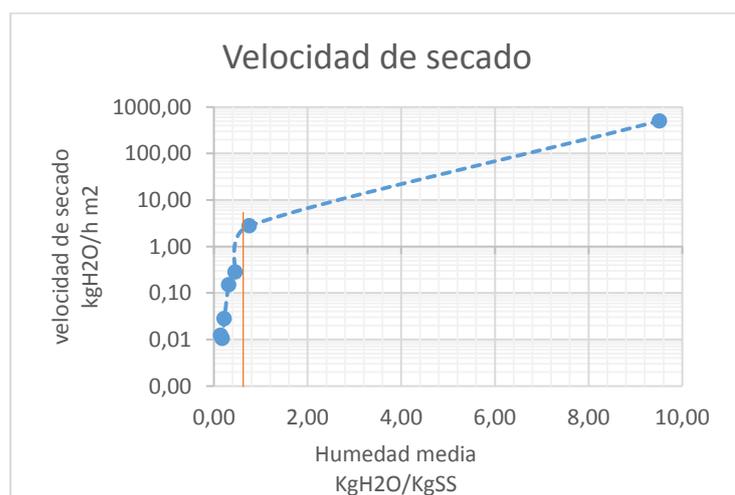


Gráfico 16: Velocidad de secado T4

En el periodo de velocidad decreciente se observa tres puntos de inflexión en la curva de secado, donde el movimiento de agua que se genera en el interior del

producto y sale hacia la superficie, se ve afectado al momento de la toma de datos, los elementos estructurales del producto sufren mayores deformaciones provocando el encogimiento del producto lo cual reduce los espacios libres y el agua empieza a desplazarse por difusión. (Colina, Irezabal, 2010)

El periodo de velocidad decreciente de secado tuvo una duración de 0,67 horas, durante este periodo la evaporación de agua se efectúa en el interior del producto y lo hace de manera descendente, desde el contenido de humedad inicial $X_0=18,05 \text{ kgH}_2\text{O/kgss}$, formando una pendiente hasta la humedad crítica $X_c=0,52 \text{ kgH}_2\text{O/kgss}$ y una velocidad crítica $R_c= 2,79 \text{ kgH}_2\text{O/hm}^2$.

4.2.2.5 Tratamiento T5

En este tratamiento los granos de café caturra rojo previamente tratados y con una humedad del 87% b.h., se sometieron a un proceso de secado fluidizante en un reactor de 13 cm de diámetro y 100 cm de altura, a una temperatura de 40°C y una velocidad del aire de 4,7 m/s, según se observa en la tabla 18.

Tabla 26 Condiciones de secado para T5

Temperatura (° C)	Velocidad del aire (m/s)	Humedad inicial (%)	Área (m ²)
45	4,7	88	0,43

Se procedió a introducir muestras de 0,5 kg para cada corrida bajo las condiciones de cada tratamiento. Las muestras para la determinación de la humedad se tomaron cada 20 minutos al inicio del proceso, y cada 60 minutos en la etapa de velocidad decreciente. En proceso de secado mediante condiciones controladas de acuerdo al tratamiento T3, el proceso de secado tuvo una duración 3,33 horas, hasta llegar a la humedad de equilibrio.

Tabla 27: Comportamiento de humedad y velocidad de secado T5

tiempo	Peso	peso bs	Humedad	humedad media	velocidad de secado
(horas)	(g)	kg (ss)	kg H2O/kgss	media \bar{X}	kgH2O/h m2
0,00	5,05	4,45	7,51		
0,33	3,18	1,60	1,01	4,26	202,11
0,67	4,11	1,76	0,75	0,88	1,45
1,00	3,34	1,33	0,66	0,70	0,39
1,33	3,49	1,05	0,43	0,55	0,52
1,83	2,62	0,70	0,36	0,40	0,09
2,33	3,37	0,63	0,23	0,30	0,09
2,83	2,87	0,28	0,11	0,17	0,06
3,33	3,05	0,14	0,05	0,08	0,01

4.2.2.5.1 Curva de secado T5

El grafico 8 indica la curva para el experimento 2 en el cual se trabajó con valores de temperatura de 45° C a una velocidad del aire de 4,7 m/s. La humedad de ingreso de la materia prima es de aproximadamente 87% b.h.

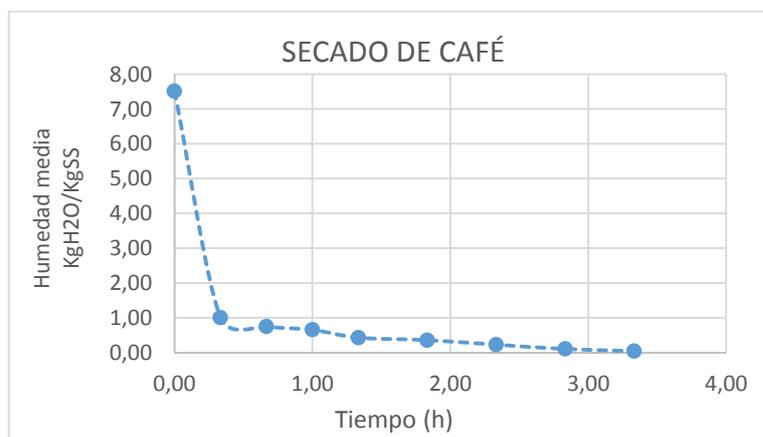


Gráfico 17: Curva de secado T5

En el grafico 11 se indica la curva de secado para el tratamiento T2, donde se aprecia los periodos de secado, el precalentamiento fue muy corto por lo que no se puede distinguir en el gráfico, Ibarz & Barbosa Cánovas (2014) mencionan que en cálculos de secado es posible desprestigiar la etapa de precalentamiento.

Durante este proceso, la operación de secado es gobernada por el mecanismo de transporte de masa de flujo capilar, debido a que la estructura celular está intacta, el agua se desplaza a través de los capilares hacia la superficie donde es eliminada a velocidad constante. El periodo de velocidad constante es de aproximadamente 0,33 horas.

4.2.2.5.2 Tiempo de secado TAU para T5

Para permitir un mejor análisis y comparación entre los tratamientos, se utiliza una herramienta muy útil de trazado de las curvas que utiliza como referencia dos puntos fijos y a la vez claves, donde la humedad va desde un valor de 60 % hasta un 12%, el cual tarda un determinado tiempo y se lo conoce como tiempo “TAU” como se identifica a continuación.

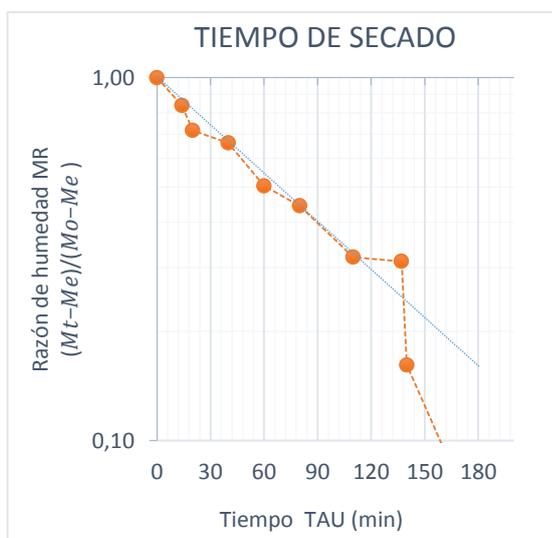


Gráfico 18: Curva de secado TAU para T5

En el gráfico 12 se utiliza un logaritmo base 10 para la Razón de Humedad, que nos permiten analizar el tiempo de secado establecido por TAU en función de la velocidad y la temperatura utilizadas. Este artificio matemático se utiliza para evaluar un rango fijo de humedad debido a la presentación de la materia prima al

ingreso al secador, la cual contiene la capa más externa del grano de café y evita que la operación de secado se establezca impidiendo la toma de datos reales de humedad y por lo tanto el cálculo del tiempo de secado. El tiempo TAU para este tramo de la curva es de unos 140 minutos, requeridos para alcanzar el valor de 12% de humedad en el producto final.

4.2.2.5.3 Velocidad de secado T5

En el gráfico 7, los periodos de velocidad de secado están diferenciados entre el periodo de velocidad constante y el periodo de velocidad decreciente. Durante el periodo de velocidad constante la evaporación se efectúa de manera constante, este periodo se mantiene hasta que la superficie del producto se encuentre alimentada por agua libre desde el interior fundamentalmente por capilaridad, el diámetro de los poros y los capilares disminuyen a medida que se elimina más cantidad de agua.

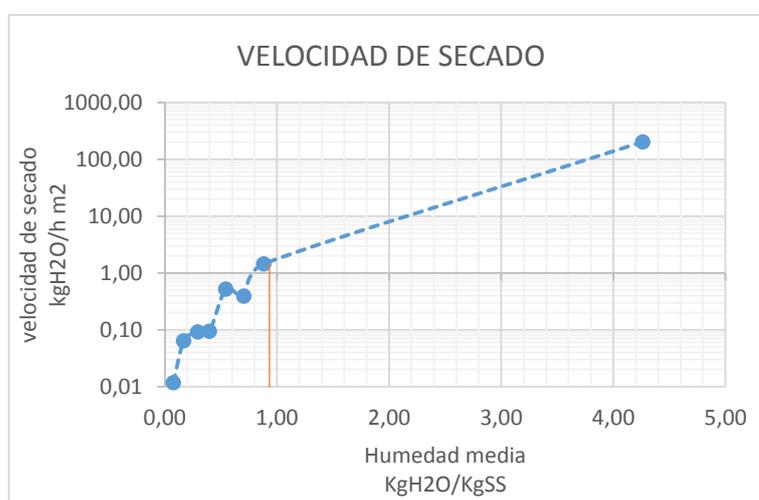


Gráfico 19: Velocidad de secado T5

En el periodo de velocidad decreciente se observa tres puntos de inflexión en la curva de secado, donde el movimiento de agua que se genera en el interior del producto y sale hacia la superficie, se ve afectado al momento de la toma de datos,

los elementos estructurales del producto sufren mayores deformaciones provocando el encogimiento del producto lo cual reduce los espacios libres y el agua empieza a desplazarse por difusión. (Colina, Irezabal, 2010)

El periodo de velocidad constante de secado tuvo una duración de 0,33 horas, durante este periodo la evaporación de agua se efectúa en la superficie del producto y lo hace de manera constante, desde el contenido de humedad inicial $X_0 = 7,59 \text{ kgH}_2\text{O/kgss}$, formando una pendiente hasta la humedad crítica $X_c = 0,70 \text{ kgH}_2\text{O/kgss}$ y una velocidad crítica $R_c = 0,39 \text{ kgH}_2\text{O/hm}^2$.

4.2.2.6 Tratamiento T6

En este tratamiento los granos de café caturra rojo previamente tratados y con una humedad del 88% b.h., se sometieron a un proceso de secado fluidizante en un reactor de 13 cm de diámetro y 100 cm de altura, a una temperatura de 40°C y una velocidad del aire de 4,7 m/s, según se observa en la tabla 18.

Tabla 28: Condiciones de secado T6

Temperatura (° C)	Velocidad del aire (m/s)	Humedad inicial (%)	Área (m ²)
45	5,5	88	0,43

Se procedió a introducir muestras de 0,5 kg para cada corrida bajo las condiciones de cada tratamiento. Las muestras para la determinación de la humedad se tomaron cada 20 minutos al inicio del proceso, y cada 60 minutos en la etapa de velocidad decreciente. En proceso de secado mediante condiciones controladas de acuerdo al tratamiento T6, el proceso de secado tuvo una duración 2,83 horas, hasta llegar a la humedad de equilibrio.

Tabla 29: Comportamiento de humedad y velocidad de secado T6

tiempo	Peso	peso bs	Humedad	humedad media	velocidad de secado
(horas)	(g)	kg (ss)	kg H2O/kgss	media \bar{X}	kgH2O/h m2
0,00	5,44	5,41	138,39		
0,33	3,59	1,60	0,80	69,59	5188,63
0,67	3,33	1,27	0,62	0,71	1,01
1,00	2,87	1,03	0,56	0,59	0,18
1,33	3,26	0,57	0,21	0,38	0,62
1,83	3,32	0,54	0,20	0,20	0,01
2,33	2,84	0,39	0,16	0,18	0,02
2,83	3,22	0,37	0,13	0,14	0,01

4.2.2.6.1 Curva de secado para T6

El grafico 8 indica la curva para el experimento 6 en el cual se trabajó con valores de temperatura de 40° C a una velocidad del aire de 4,7 m/s. La humedad de ingreso de la materia prima es de aproximadamente 87% bh.

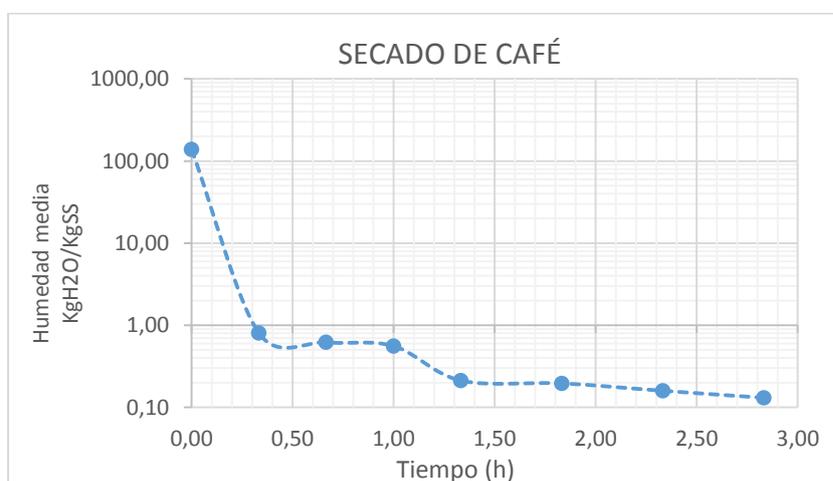


Gráfico 20: Curva de secado

En el grafico 20 se indica la curva de secado para T6, donde se aprecia los periodos de secado, el precalentamiento fue muy corto por lo que no se puede distinguir en el gráfico, Ibarz & Barbosa Cánovas (2014) mencionan que en cálculos de secado es posible despreciar la etapa de precalentamiento.

Durante este proceso, la operación de secado es gobernada por el mecanismo de transporte de masa de flujo capilar, debido a que la estructura celular está intacta, el agua se desplaza a través de los capilares hacia la superficie donde es eliminada a velocidad constante (Chakraverty, 2014). El periodo de velocidad constante es de aproximadamente 0,33 horas.

4.2.2.6.2 Tiempo TAU de secado para T6

Para permitir un mejor análisis y comparación entre los tratamientos, se utiliza una herramienta muy útil de trazado de las curvas que utiliza como referencia dos puntos fijos y a la vez claves, donde la humedad va desde un valor de 60 % hasta un 12%, el cual tarda un determinado tiempo y se lo conoce como tiempo “TAU” como se identifica a continuación.



Gráfico 21: Curva de secado TAU para T6

En el gráfico 21 se utiliza un logaritmo base 10 para la Razón de Humedad, que nos permiten analizar el tiempo de secado establecido por TAU en función de la velocidad y la temperatura utilizadas. Este artificio matemático se utiliza para evaluar un rango fijo de humedad debido a la presentación de la materia prima al ingreso al secador, la cual contiene la capa más externa del grano de café y evita que la operación de secado se establezca impidiendo la toma de datos reales de

humedad y por lo tanto el cálculo del tiempo de secado. El tiempo TAU para este tramo de la curva es de unos 180 minutos, requeridos para alcanzar el valor de 12% de humedad en el producto final.

4.2.2.6.3 Velocidad de secado para T6

En el gráfico 7, los periodos de velocidad de secado están diferenciados entre el periodo de velocidad constante y el periodo de velocidad decreciente. Durante el periodo de velocidad constante la evaporación se efectúa de manera constante, este periodo se mantiene hasta que la superficie del producto se encuentre alimentada por agua libre desde el interior fundamentalmente por capilaridad, el diámetro de los poros y los capilares disminuyen a medida que se elimina más cantidad de agua.

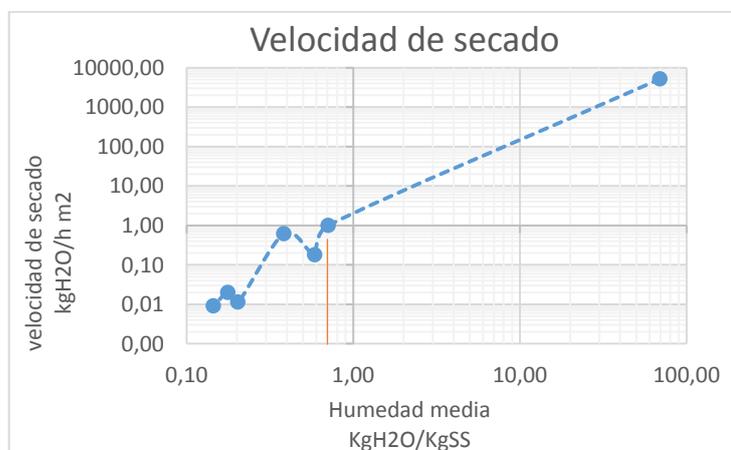


Gráfico 22: Velocidad de secado T6

En el periodo de velocidad decreciente se observa tres puntos de inflexión en la curva de secado, donde el movimiento de agua que se genera en el interior del producto y sale hacia la superficie, se ve afectado al momento de la toma de datos, los elementos estructurales del producto sufren mayores deformaciones provocando el encogimiento del producto lo cual reduce los espacios libres y el agua empieza a desplazarse por difusión. (Colina, Irezabal, 2010)

El periodo de velocidad constante de secado tuvo una duración de 0,33 horas, durante este periodo la evaporación de agua se efectúa en la superficie del producto y lo hace de manera constante, desde el contenido de humedad inicial $X_0 = 138,39 \text{ kgH}_2\text{O/kgss}$, formando una pendiente hasta la humedad crítica $X_c = 0,80 \text{ kgH}_2\text{O/kgss}$ y una velocidad crítica $R_c = 0,62 \text{ kgH}_2\text{O/hm}^2$.

4.2.2.7 Tratamiento T7 (A3B1)

En este tratamiento los granos de café caturra rojo previamente tratados y con una humedad del 87% b.h., se sometieron a un proceso de secado fluidizante en un reactor de 13 cm de diámetro y 100 cm de altura, a una temperatura de 50°C y una velocidad del aire de 3,9 m/s, según se observa en la tabla 18.

Tabla 30: Condiciones de secado T7

Temperatura ($^\circ \text{C}$)	Velocidad del aire (m/s)	Humedad inicial (%)	Área (m ²)
50	3,9	88	0,43

Se procedió a introducir muestras de 0,5 kg para cada corrida bajo las condiciones de cada tratamiento. Las muestras para la determinación de la humedad se tomaron cada 20 minutos al inicio del proceso, y cada 60 minutos en la etapa de velocidad decreciente. En proceso de secado mediante condiciones controladas de acuerdo al tratamiento T3, el proceso de secado tuvo una duración 6,00 horas, hasta llegar a la humedad de equilibrio.

Tabla 31: Comportamiento de humedad y velocidad de secado T7

tiempo	Peso	peso bs	Humedad	humedad media	velocidad de secado
(horas)	(g)	kg (ss)	kg H ₂ O/kgss	media \bar{X}	kgH ₂ O/h m ²
0,00	6,90	6,33	11,16		
0,33	4,45	2,72	1,57	6,36	423,55
0,67	4,96	2,33	0,89	1,23	6,49
1,00	4,90	2,07	0,73	0,81	0,85
1,33	5,23	2,18	0,71	0,72	0,07
2,33	4,13	1,34	0,48	0,60	0,50
4,00	4,11	1,18	0,40	0,44	0,06
4,50	4,34	1,14	0,36	0,38	0,03
6,00	3,62	0,82	0,30	0,33	0,03
6,50	3,57	0,46	0,15	0,22	0,04

4.2.2.7.1 Curva de secado T7

En el gráfico 23 se muestra la curva de secado para T7 en el cual se trabajó con valores de temperatura de 50° C y velocidad del aire de 3,9 m/s. La humedad de ingreso de la materia prima es de aproximadamente 88% bh.

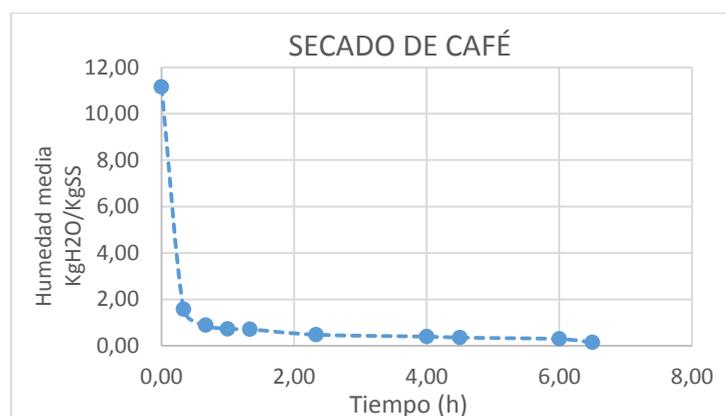


Gráfico 23: Curva de secado T7

En el gráfico 23 se indica la curva de secado para T7, donde se aprecia los periodos de secado, el precalentamiento fue muy corto por lo que no se puede distinguir en el gráfico, Ibarz & Barbosa Cánovas (2014) mencionan que en cálculos de secado es posible despreciar la etapa de precalentamiento.

Durante este proceso, la operación de secado es gobernada por el mecanismo de transporte de masa de flujo capilar, debido a que la estructura celular está intacta, el agua se desplaza a través de los capilares hacia la superficie donde es eliminada a velocidad constante (Chakraverty, 2014). El periodo de velocidad constante es de aproximadamente 0,33 horas. Y aproximadamente 2,00 horas en el periodo de velocidad decreciente.

4.2.2.7.2 Tiempo TAU para T7

Para permitir un mejor análisis y comparación entre los tratamientos, se utiliza una herramienta muy útil de trazado de las curvas que utiliza como referencia dos puntos fijos y a la vez claves, donde la humedad va desde un valor de 60 % hasta un 12%, el cual tarda un determinado tiempo y se lo conoce como tiempo “TAU” como se identifica a continuación.

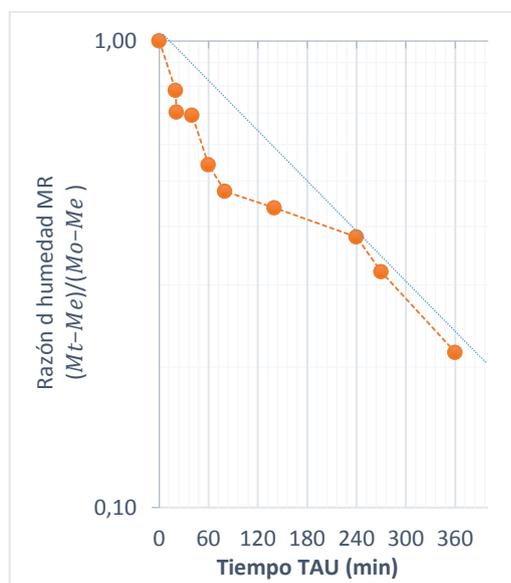


Gráfico 24: Curva de secado TAU para T7

En el gráfico 24 se utiliza un logaritmo base 10 para la Razón de Humedad, que nos permiten analizar el tiempo de secado establecido por TAU en función de la velocidad y la temperatura utilizadas. Este artificio matemático se utiliza para evaluar un rango fijo de humedad debido a la presentación de la materia prima al

ingreso al secador, la cual contiene la capa más externa del grano de café y evita que la operación de secado se establezca impidiendo la toma de datos reales de humedad y por lo tanto el cálculo del tiempo de secado. El tiempo TAU para este tramo de la curva es de unos 360 minutos, requeridos para alcanzar el valor de 12% de humedad en el producto final.

4.2.2.7.3 Velocidad de secado T7

En el gráfico 25, los periodos de velocidad de secado están diferenciados entre el periodo de velocidad constante y el periodo de velocidad decreciente. Durante el periodo de velocidad constante la evaporación se efectúa de manera constante, este periodo se mantiene hasta que la superficie del producto se encuentre alimentada por agua libre desde el interior fundamentalmente por capilaridad, el diámetro de los poros y los capilares disminuyen a medida que se elimina más cantidad de agua.

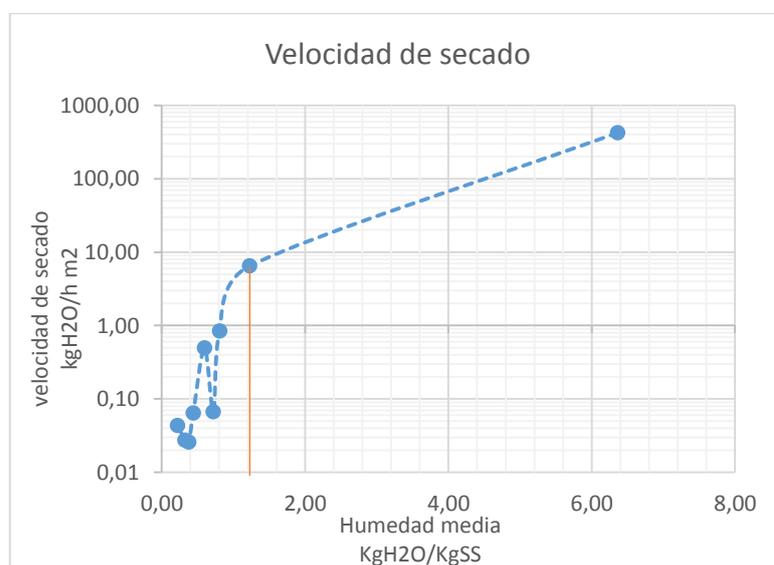


Gráfico 25: Velocidad de secado T7

En el periodo de velocidad decreciente se observa tres puntos de inflexión en la curva de secado, donde el movimiento de agua que se genera en el interior del producto y sale hacia la superficie, se ve afectado al momento de la toma de datos,

los elementos estructurales del producto sufren mayores deformaciones provocando el encogimiento del producto lo cual reduce los espacios libres y el agua empieza a desplazarse por difusión. (Colina, Irezabal, 2010)

El periodo de velocidad constante de secado tuvo una duración de 6,50 horas, durante este periodo la evaporación de agua se efectúa en la superficie del producto y lo hace de manera constante, desde el contenido de humedad inicial $X_0 = 11,16 \text{ kgH}_2\text{O/kgss}$, formando una pendiente hasta la humedad crítica $X_c = 1,57 \text{ kgH}_2\text{O/kgss}$ y una velocidad crítica $R_c = 5,59 \text{ kgH}_2\text{O/hm}^2$.

4.2.2.8 Tratamiento T8 (A3B2)

En este tratamiento los granos de café caturra rojo previamente tratados y con una humedad del 66% b.h., se sometieron a un proceso de secado fluidizante en un reactor de 13 cm de diámetro y 100 cm de altura, a una temperatura de 50°C y una velocidad del aire de 4,7 m/s, según se observa en la tabla 29.

Tabla 32: Condiciones de secado T8

Temperatura (° C)	Velocidad del aire (m/s)	Humedad inicial (%)	Área (m ²)
50	4,7	66	0,43

Se procedió a introducir muestras de 0,5 kg para cada corrida bajo las condiciones de cada tratamiento. Las muestras para la determinación de la humedad se tomaron cada 20 minutos al inicio del proceso, y cada 60 minutos en la etapa de velocidad decreciente. En proceso de secado mediante condiciones controladas de acuerdo al tratamiento T3, el proceso de secado tuvo una duración 5,00 horas, hasta llegar a la humedad de equilibrio.

Tabla 33: Comportamiento de la humedad y velocidad de secado T8

tiempo	Peso	peso bs	Humedad	humedad media	velocidad de secado
(horas)	(g)	kg (ss)	kg H2O/kgss	media \bar{X}	kgH2O/h m2
0,00	4,54	3,01	1,96		
0,33	4,10	1,72	0,73	1,34	25,94
0,67	3,84	1,93	1,01	0,87	1,71
1,00	3,67	1,34	0,58	0,79	1,95
1,33	3,34	1,05	0,46	0,52	0,28
2,33	3,41	0,55	0,19	0,33	0,28
3,83	3,60	0,50	0,16	0,18	0,01
4,33	3,35	0,44	0,15	0,16	0,00
5,00	2,47	0,28	0,13	0,14	0,01

4.2.2.8.1 Curva de secado T8

En el grafico 26 se muestra la curva de secado para el T8 en el cual se trabajó con valores de temperatura de 50° C y velocidad del aire de 4,7 m/s. La humedad de ingreso de la materia prima es de aproximadamente 66% bh.

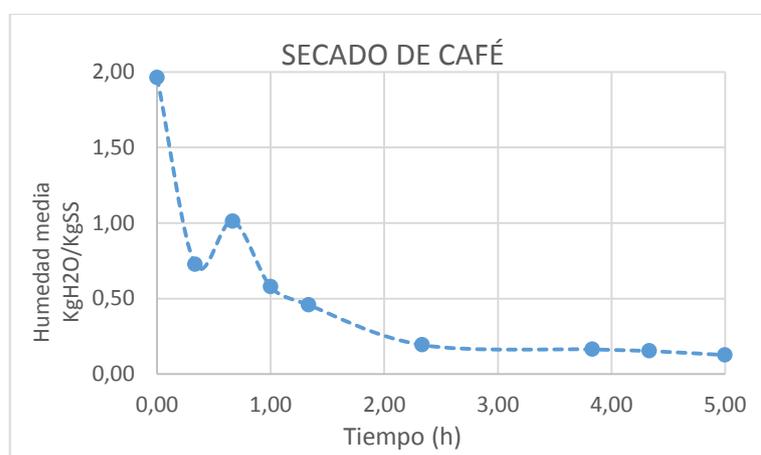


Gráfico 26: Curva de secado T8

En el grafico 26 se indica la curva de secado para T8, donde se aprecia los periodos de secado, el precalentamiento fue muy corto por lo que no se puede distinguir en el gráfico, Ibarz & Barbosa Cánovas (2014) mencionan que en cálculos de secado es posible despreciar la etapa de precalentamiento.

Durante la primera etapa de este proceso, la operación de secado es gobernada por el mecanismo de transporte de masa de flujo capilar, debido a que la estructura celular está intacta, el agua se desplaza a través de los capilares hacia la superficie donde es eliminada a velocidad constante (Chakraverty, 2014). El periodo de velocidad constante es de aproximadamente 0,67 horas. Mientras que para el periodo de velocidad decreciente es de 2,33 horas.

4.2.2.8.2 Tiempo TAU para T8

Para permitir un mejor análisis y comparación entre los tratamientos, se utiliza una herramienta muy útil de trazado de las curvas que utiliza como referencia dos puntos fijos y a la vez claves, donde la humedad va desde un valor de 60 % hasta un 12%, el cual tarda un determinado tiempo y se lo conoce como tiempo “TAU” como se identifica a continuación.

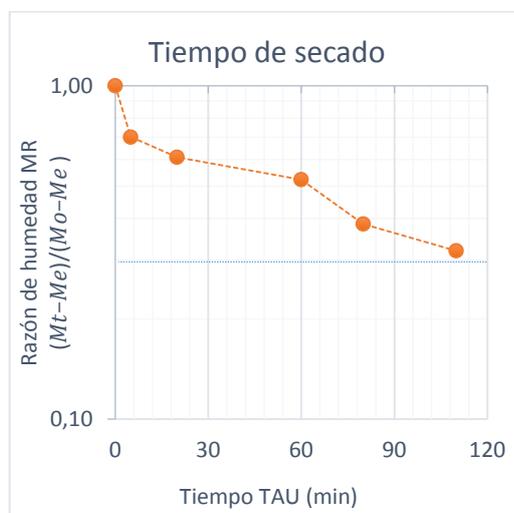


Gráfico 27: Curva de secado TAU para T8

En el gráfico 27 se utiliza un logaritmo base 10 para la Razón de Humedad, que nos permiten analizar el tiempo de secado establecido por TAU en función de la velocidad y la temperatura utilizadas. Este artificio matemático se utiliza para evaluar un rango fijo de humedad debido a la presentación de la materia prima al ingreso al secador, la cual contiene la capa más externa del grano de café y evita

que la operación de secado se estabilice impidiendo la toma de datos reales de humedad y por lo tanto el cálculo del tiempo de secado. El tiempo TAU para este tramo de la curva es de unos 124 minutos, requeridos para alcanzar el valor de 12% de humedad en el producto final.

4.2.2.8.3 Velocidad de secado T8

En el gráfico 28, los periodos de velocidad de secado están diferenciados entre el periodo de velocidad constante y el periodo de velocidad decreciente. Durante el periodo de velocidad constante la evaporación se efectúa de manera constante, este periodo se mantiene hasta que la superficie del producto se encuentre alimentada por agua libre desde el interior fundamentalmente por capilaridad, el diámetro de los poros y los capilares disminuyen a medida que se elimina más cantidad de agua.

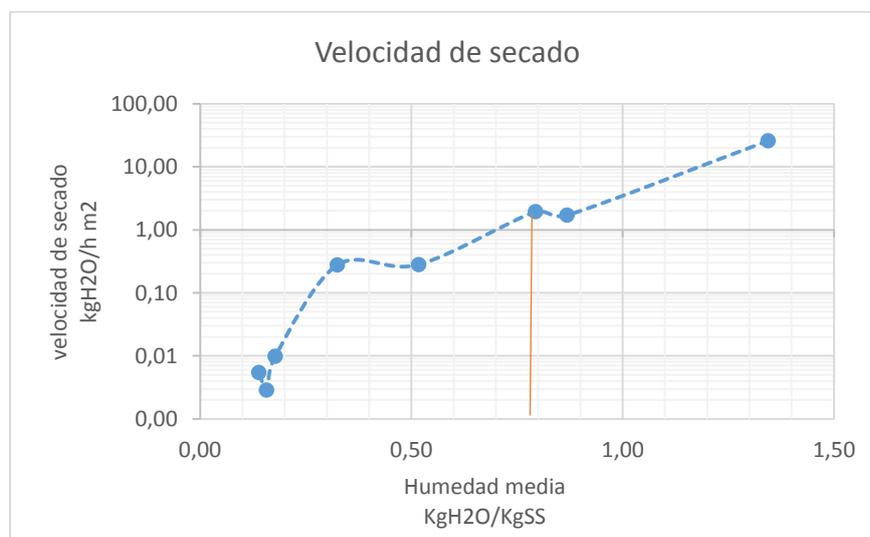


Gráfico 28: Velocidad de secado

En el periodo de velocidad decreciente se observa tres puntos de inflexión en la curva de secado, donde el movimiento de agua que se genera en el interior del producto y sale hacia la superficie, se ve afectado al momento de la toma de datos, los elementos estructurales del producto sufren mayores deformaciones

provocando el encogimiento del producto lo cual reduce los espacios libres y el agua empieza a desplazarse por difusión. (Colina, Irezabal, 2010)

El periodo de velocidad constante de secado tuvo una duración de 0,33 horas, durante este periodo la evaporación de agua se efectúa en la superficie del producto y lo hace de manera constante, desde el contenido de humedad inicial $X_0 = 1,96 \text{ kgH}_2\text{O/kgss}$, formando una pendiente hasta la humedad crítica $X_c = 0,73 \text{ kgH}_2\text{O/kgss}$ y una velocidad crítica $R_c = 0,29 \text{ kgH}_2\text{O/hm}^2$.

Mientras que para el periodo de velocidad decreciente se tiene una duración de 2,33 horas, este punto forma la pendiente con la humedad crítica $X_c = 0,19 \text{ kgH}_2\text{O/kgss}$ y una velocidad crítica $R_c = 0,29 \text{ kgH}_2\text{O/hm}^2$.

4.2.2.9 Tratamiento T9 (A3B3)

En este tratamiento los granos de café caturra rojo previamente tratados y con una humedad del 87% b.h., se sometieron a un proceso de secado fluidizante en un reactor de 13 cm de diámetro y 100 cm de altura, a una temperatura de 40°C y una velocidad del aire de 4,7 m/s, según se observa en la tabla 18.

Tabla 34: Condiciones de secado T9

Temperatura (° C)	Velocidad del aire (m/s)	Humedad inicial (%)	Área (m ²)
50	55	88	0,43

Se procedió a introducir muestras de 0,5 kg para cada corrida bajo las condiciones de cada tratamiento. Las muestras para la determinación de la humedad se tomaron cada 20 minutos al inicio del proceso, y cada 60 minutos en la etapa de velocidad decreciente. En proceso de secado mediante condiciones controladas de acuerdo al tratamiento T3, el proceso de secado tuvo una duración 6,00 horas, hasta llegar a la humedad de equilibrio.

Tabla 35: Comportamiento de humedad y velocidad de secado T9

tiempo	Peso	peso bs	Humedad	humedad media	velocidad de secado
(horas)	(g)	kg (ss)	kg H2O/kgss	media \bar{X}	kgH2O/h m2
0,00	3,10	1,90	1,58		
0,33	3,51	1,52	0,76	1,17	10,80
0,67	3,33	1,28	0,62	0,69	0,73
1,00	3,69	1,27	0,53	0,58	0,29
1,33	3,47	0,89	0,35	0,44	0,40
1,83	4,15	0,84	0,25	0,30	0,10
7,00	3,82	0,61	0,19	0,22	0,02
8,00	3,66	0,58	0,19	0,19	0,00

4.2.2.9.1 Curva de secado T9

En el gráfico 29 se muestra la curva de secado para el T9 en el cual se trabajó con valores de temperatura de 50° C y velocidad del aire de 5,5 m/s. La humedad de ingreso de la materia prima es de aproximadamente 88% bh.

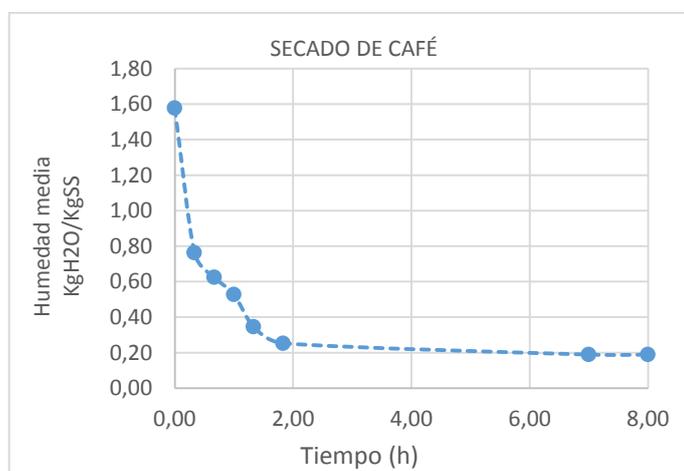


Gráfico 29: Curva de secado para el tratamiento T9 (A3B3)

En el gráfico 29 se indica la curva de secado para T9, donde se aprecia los periodos de secado, el precalentamiento fue muy corto por lo que no se puede distinguir en el gráfico, Ibarz & Barbosa Cánovas (2014) mencionan que en cálculos de secado es posible desprestigiar la etapa de precalentamiento.

La primera etapa de este proceso, la operación de secado es gobernada por el mecanismo de transporte de masa de flujo capilar, debido a que la estructura celular está intacta, el agua se desplaza a través de los capilares hacia la superficie donde es eliminada a velocidad constante (Chakraverty, 2014). El periodo de velocidad constante es de aproximadamente 0,33 horas. Mientras que para el periodo de velocidad decreciente es de 1,83 horas.

4.2.2.9.2 Tiempo TAU para T9

Para permitir un mejor análisis y comparación entre los tratamientos, se utiliza una herramienta muy útil de trazado de las curvas que utiliza como referencia dos puntos fijos y a la vez claves, donde la humedad va desde un valor de 60 % hasta un 12%, el cual tarda un determinado tiempo y se lo conoce como tiempo “TAU” como se identifica a continuación.

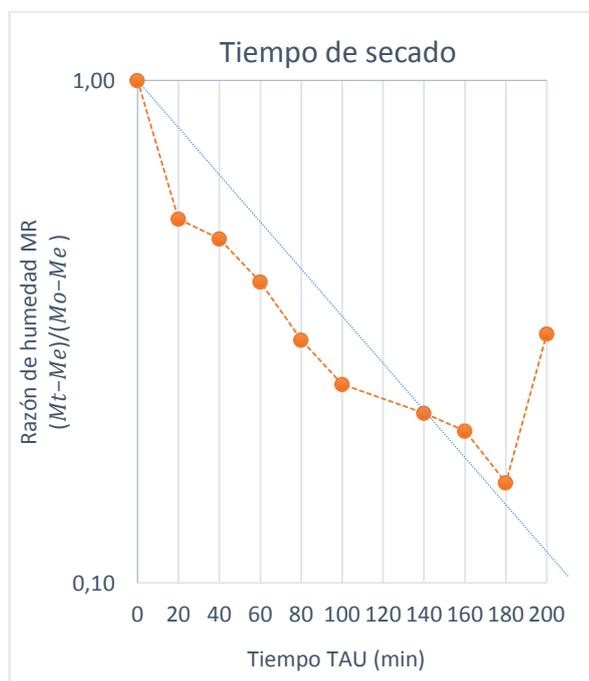


Gráfico 30: Curva de secado TAU para T9

En el gráfico 30 se utiliza un logaritmo base 10 para la Razón de Humedad, que nos permiten analizar el tiempo de secado establecido por TAU en función de la

velocidad y la temperatura utilizadas. Este artificio matemático se utiliza para evaluar un rango fijo de humedad debido a la presentación de la materia prima al ingreso al secador, la cual contiene la capa más externa del grano de café y evita que la operación de secado se estabilice impidiendo la toma de datos reales de humedad y por lo tanto el cálculo del tiempo de secado. El tiempo TAU para este tramo de la curva es de unos 180 minutos, requeridos para alcanzar el valor de 12% de humedad en el producto final.

4.2.2.9.3 Velocidad de secado T9

En el gráfico 31, los periodos de velocidad de secado están diferenciados entre el periodo de velocidad constante y el periodo de velocidad decreciente. Durante el periodo de velocidad constante la evaporación se efectúa de manera constante, este periodo se mantiene hasta que la superficie del producto se encuentre alimentada por agua libre desde el interior fundamentalmente por capilaridad, el diámetro de los poros y los capilares disminuyen a medida que se elimina más cantidad de agua.

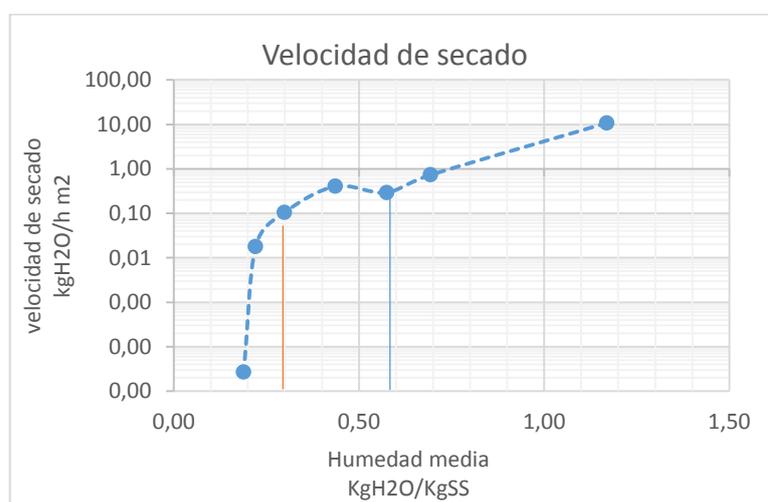


Gráfico 31: Velocidad de secado

En el periodo de velocidad decreciente se observa tres puntos de inflexión en la curva de secado, donde el movimiento de agua que se genera en el interior del producto y sale hacia la superficie, se ve afectado al momento de la toma de datos,

los elementos estructurales del producto sufren mayores deformaciones provocando el encogimiento del producto lo cual reduce los espacios libres y el agua empieza a desplazarse por difusión. (Colina, Irezabal, 2010)

El periodo de velocidad constante de secado tuvo una duración de 0,33 horas, durante este periodo la evaporación de agua se efectúa en la superficie del producto y lo hace de manera constante, desde el contenido de humedad inicial $X_0=1,58 \text{ kgH}_2\text{O/kgss}$, formando una pendiente hasta la humedad crítica $X_c=0,76 \text{ kgH}_2\text{O/kgss}$ y una velocidad crítica $W_c= 0,10 \text{ kgH}_2\text{O/hm}^2$.

Mientras que para el periodo de velocidad decreciente se tiene una duración de 1,83 horas formando una pendiente hasta la humedad crítica $X_c=0,25 \text{ kgH}_2\text{O/kgss}$ y una velocidad crítica $R_c= 0,08 \text{ kgH}_2\text{O/hm}^2$.

4.2.3 TIEMPO GLOBAL DE SECADO

Una vez obtenido el mejor resultado en el comportamiento de las curvas en determinado período del secado se procedió a calcular el tiempo global de secado en el mejor tratamiento es decir el producto de la combinación de 50° C con una velocidad del aire de $5,5 \text{ m/s}$, relacionando la humedad desde el inicio del proceso que es de aproximadamente 60%, hasta llegar a la humedad de 10-12% en el producto final.

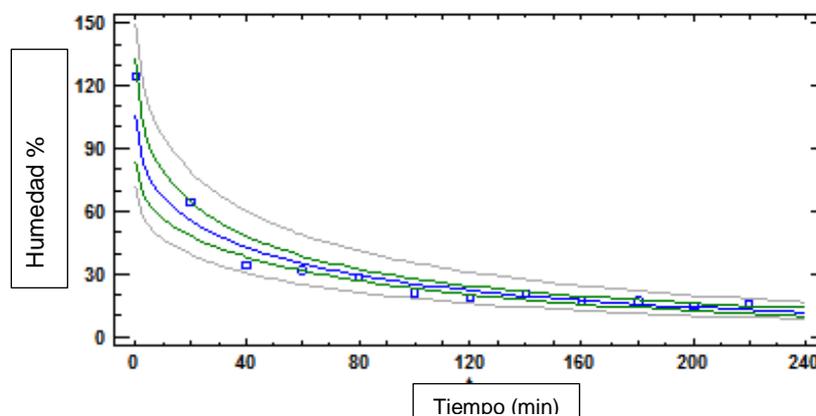


Gráfico 32: Tiempo global de secado del mejor tratamiento ($50^\circ \text{ C} - 5,5 \text{ m/s}$). El tiempo hasta llegar a 12 % de humedad nos da 240 min. Unas 4 horas de secado.

De acuerdo a Fontal (2010), al utilizar aire de secado de aproximadamente 49° C y 19% de humedad relativa se favorece considerablemente el proceso de secado en lecho fluidizado, presentándose una mayor razón de cambio (tasa de secado) y lográndose de esta forma tiempos finales de secado hasta alcanzar la humedad requerida (de 10 a 12% b.h), muy próximos a 7 horas. De acuerdo a los resultados se puede afirmar lo siguiente: “La tasa de secado es menor cuando el contenido de agua se reduce, debido a que el líquido restante se evapora con mayor dificultad, hasta llegar al punto de equilibrio donde no se elimina más humedad” (Jaramillo Calle & Narváez Quiranza, 2012).

La tabla de análisis de varianza particiona la variabilidad en Tau en piezas separadas para cada uno de los efectos. A continuación, pone a prueba la significación estadística de cada efecto comparando el cuadrado medio contra una estimación del error experimental. En este caso, 3 efectos tienen los valores de p inferior a 0,05, lo que indica que son significativamente diferentes de cero en el nivel de confianza del 95,0%.

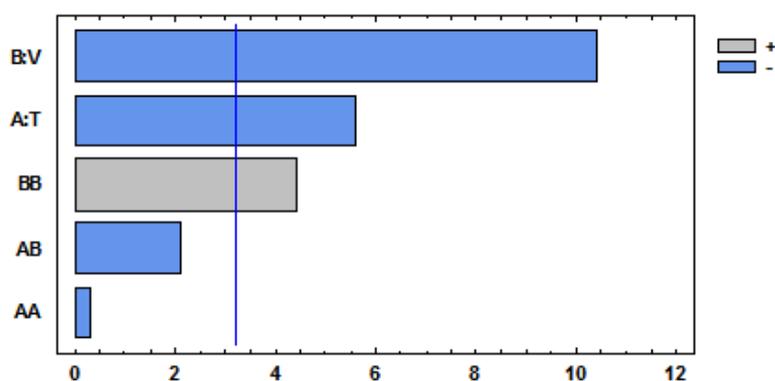


Gráfico 33: Diagrama de Pareto estandarizado para Tau

En la gráfica se muestra la significación estadística para cada uno de los factores, en este caso existe significación para el factor A, B.

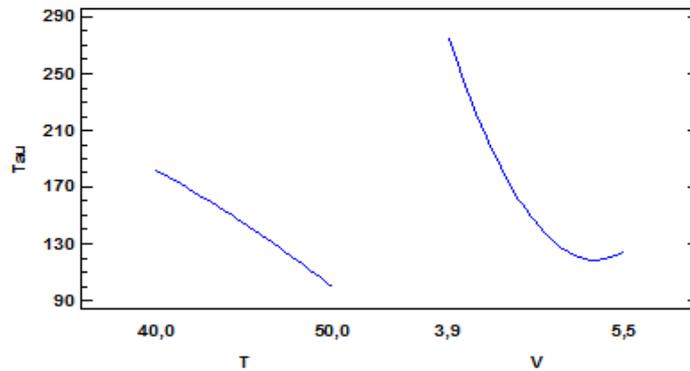


Gráfico 34: Trama principal de los efectos para TAU

En la gráfica se aprecia la rapidez de deshidratado Tau en minutos tomando en cuenta la influencia de la velocidad y de temperatura por separado; en la parte izquierda se observa una pendiente no muy pronunciada lo cual significa que a medida que pasa el tiempo, en minutos designado por TAU, no existe influencia considerable cuando varía la temperatura; por lo contrario, al lado derecho se observa el comportamiento de la pendiente cuando se varía la velocidad del aire.

4.2.4 ACTIVIDAD DE AGUA

En gráfico se muestran los valores de actividad de agua contenida en cada uno de los tratamientos.

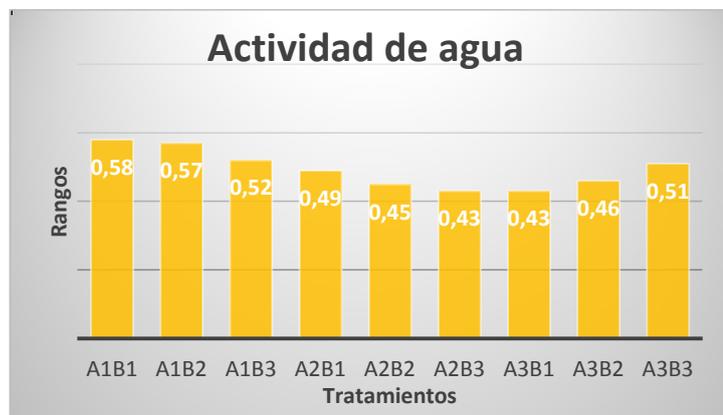


Gráfico 35: Actividad de agua para cada tratamiento

El gráfico nos muestra los valores de actividad agua presente en el producto seco los cuales varían de acuerdo a los cambios de temperatura y velocidad del aire.

Como menciona Badui (2006), el valor de actividad de agua se incrementa cuando se eleva la temperatura, ya que igualmente lo hace la presión de vapor. Los productos deshidratados van aproximadamente de 0,3 a 0,6 de actividad de agua.

AQUALAB (2003), menciona que la baja actividad de agua en productos secos permite mantener una apropiada estructura, estabilidad y propiedades de rehidratación.

4.3 SECADO PULSANTE

Se realizaron corridas aplicando pulsaciones (100 pul/min), al mejor tiempo obtenido en el proceso de secado, es decir 50 °C de temperatura con 5,5 m/s de velocidad del aire, con el fin de evaluar por separado la influencia del aire de manera continua y en pulsaciones obteniendo lo siguiente.

Cuadro 3: Secado pulsante; 100 pul/min, 50 °C y 5,5 m/s

cajas	exp	Tiempo (MIN)	t0	t1	t2	t3	BASE SECA			BASE HÚMEDA			masa de mp
							w1	w2	w3	w1	w2	w3	
38,2870	1	0	40,7444	40,3785	40,2437	40,216	14,8897	25,59	27,39	14,8897	20,3752	21,5024	2,4574
38,8837	2	20	40,5396	40,2646	40,2207	40,2069	16,6073	23,85	25,14	16,6073	19,2584	20,0918	1,6559
39,0207	3	40	40,1746	39,9654	39,9519	39,9477	18,1298	23,92	24,48	18,1298	19,2998	19,6637	1,1539
38,8799	4	60	40,4901	40,3004	40,2888	40,2678	11,7811	14,29	16,02	11,7811	12,5016	13,8057	1,6102
40,5062	5	80	41,5663	41,4495	41,4409	41,4276	11,0178	13,42	15,05	11,0178	11,8291	13,0837	1,0601
39,0091	6	110	39,9009	39,7744	39,7651	39,7602	14,1848	17,96	18,73	14,1848	15,2276	15,7771	0,8918
39,6966	7	140	41,0264	40,8839	40,8636	40,8567	10,7159	13,95	14,63	10,7159	12,2424	12,7613	1,3298
39,1074	8	240	40,1665	40,048	40,0265	40,0275	11,1887	15,23	15,11	11,1887	13,2188	13,1244	1,0591
39,5257	9	270	40,862	40,7386	40,724	40,7249	9,2345	11,52	11,43	9,2345	10,3270	10,2597	1,3363
39,0917	10	300	40,2917	40,1548	40,1487	40,1515	11,4083	13,53	13,23	11,4083	11,9167	11,6833	1,2000

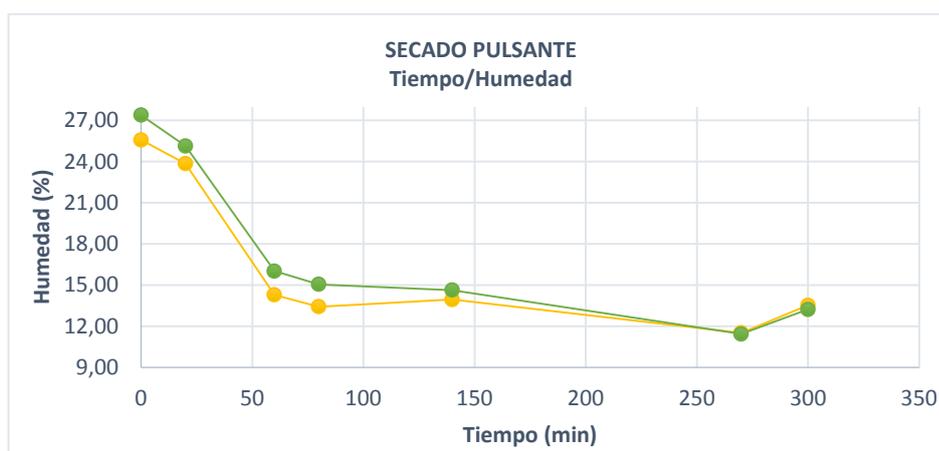


Gráfico 36: Secado pulsante para el mejor tratamiento (50 °C – 5,5 m/s)

Se utilizó un grano con aproximadamente 30% de humedad al inicio del proceso, es decir la mitad de agua contenida en los granos utilizados para el mismo proceso con aire continuo para comparar el tiempo de secado hasta 11%, lo que nos dio como resultado un deshidratado más lento tardando unos 270 minutos, es decir el 50% más de tiempo, esto se debe que al cortar el flujo de aire también se corta la transferencia de calor a los granos.

4.4 CONTENIDO DE HUMEDAD EN EL PRODUCTO FINAL

Para esta variable se midió la humedad contenida en el lecho de granos al final de cada corrida para cada tratamiento y se obtuvo los siguientes resultados.

Tabla 36: Valores de humedad final para cada tratamiento

Tratamientos	R1	R2	R3	Sumatoria	Media
A1B1	11,91	12,05	11,44	35,4	11,8
A1B2	11,9	11,35	12,12	35,37	11,79
A1B3	12,36	12,27	12,38	37,01	12,34
A2B1	10	9,98	10,06	30,04	10,01
A2B2	9	9,11	8,96	27,07	9,02
A2B3	11	10,89	11,05	32,94	10,98
A3B1	12	12,77	12	36,77	12,26
A3B2	11,21	11,53	11,23	33,97	11,32
A3B3	9	9,13	9,04	27,17	9,06

Sumatoria Total: 295,74

Con los valores de las medias se grafica un histograma donde se puede apreciar las variaciones de humedad al final de cada operación de secado.

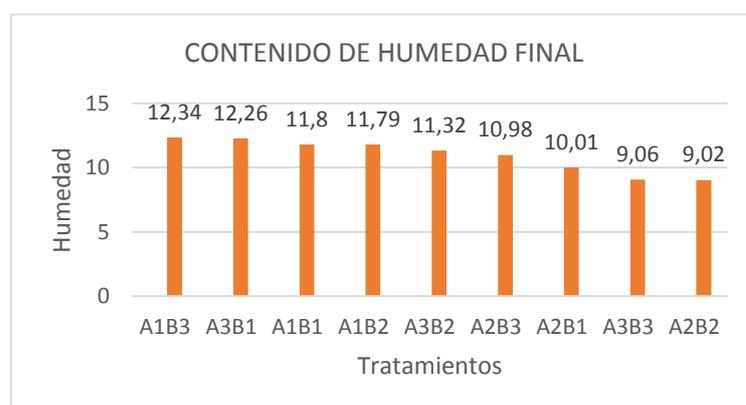


Gráfico 37: Contenido de humedad en el producto final

Como se muestra en el grafico las humedades son diferentes entre cada tratamiento al final del proceso, esto se debe a que no se dispone de la tecnología necesaria para medir la humedad directamente sobre los granos en el momento de la operación, por tanto se utilizó el método de la estufa para la determinación de la humedad.

Tabla 37: Análisis de varianza para la humedad final del grano

F.V	SC	GL	CM	F. cal	F. Tab 5%	F. Tab 1%
Total	41,14	26				
Trat.	40,12	8	5,02	83,67 **	2,51	3,71
FA	17,54	2	8,77	146,17 **	3,55	6,01
FB	2,22	2	1,11	18,5 **	3,55	6,01
IAB	20,36	4	5,09		2,93	4,58
Error	1,02	18	0,06			

CV: 2,24%

Después del análisis de varianza de la variable humedad final del café, se determina alta significación estadística para tratamientos, factor A y factor B. Por tanto se realizó las pruebas de tukey para tratamientos y diferencia media significativa para factores.

Tabla 38: prueba de tukey para tratamientos de la variable humedad final del grano

Tratamientos	Medias	Tukey
A1B3	12,34	A
A3B1	12,26	A
A1B1	11,8	A B
A1B2	11,79	A B
A3B2	11,32	A B C
A2B3	10,98	A B C D
A2B1	10,01	B C D
A3B3	9,06	D
A2B2	9,02	D

Realizada la prueba de tukey se observa que existen cuatro rangos diferentes, en donde las medias se ordenaron de mayor a menor porque así lo establece la prueba de tukey. Para fines de la investigación se ha considerado el mejor tratamiento T9 (50 °C, 5,5 m/s) con un promedio de 9,02% de humedad el cual se encuentra en el rango D, por tener menor porcentaje de humedad.

Tabla 39: Pueba DMS para factor A (temperatura) de la variable humedad final del grano

Factores	Medias	DMS
A1	11,98	A
A3	10,88	B
A2	10,01	C

De acuerdo a los resultados obtenidos en la tabla, se establecen tres rangos para el factor A en función de la variable humedad final del grano, el nivel de temperatura que alcanzó el menor contenido de humedad 10,01% es A2 (45 °C) y se ubica en el rango C.

Tabla 40: Prueba DMS para el factor B (velocidad del aire) de la variable humedad final del grano

Factores	Media	DMS
B1	11,36	A
B3	10,79	B
B2	10,71	B

Realizada la prueba de DMS para el factor B (velocidad del aire), se observa dos rangos, los cuales son diferentes. La velocidad del aire B2 (4,7 m/s) presenta el promedio más bajo de humedad (10,71%), para fines de investigación se lo considera como el mejor tratamiento y se encuentra en el rango B.

Geankoplis 1995, dice: los microorganismos dejan de ser activos cuando el contenido de agua se reduce por debajo del 10% en peso, sin embargo generalmente es necesario reducir este contenido de humedad por debajo del 5%, para preservar el sabor y su valor nutritivo.

A temperaturas bajas de secado se elimina el agua de los alimentos, en cambio a temperaturas altas se evapora el agua y ciertos compuestos volátiles como: alcaloides, compuestos aromáticos y otros.

4.5 HOMOGENEIDAD DEL CONTENIDO DE HUMEDAD EN LOS GRANOS

Se determinó la uniformidad del contenido de humedad con el fin de garantizar la eficiencia del proceso. La muestra 1 corresponde a los granos que al momento de fluidizar se quedan en el fondo del reactor y no tienen mucha movilidad, la muestra dos corresponde a los granos más uniformes y con características geométricas regulares, la muestra 3 son los granos más livianos que tienden a salir del reactor por su bajo contenido de humedad.

Según Cala (2007), en el secado de arroz en un reactor de lecho fluidizado pulsante se obtiene una mayor uniformidad en el contenido de humedad final del grano. Las investigaciones muestran buenos resultados en términos de contenido de humedad final (Rocha & Taranto, 2008), menor tiempo de secado, menores costos de operación, entre otras ventajas respecto al lecho fijo.

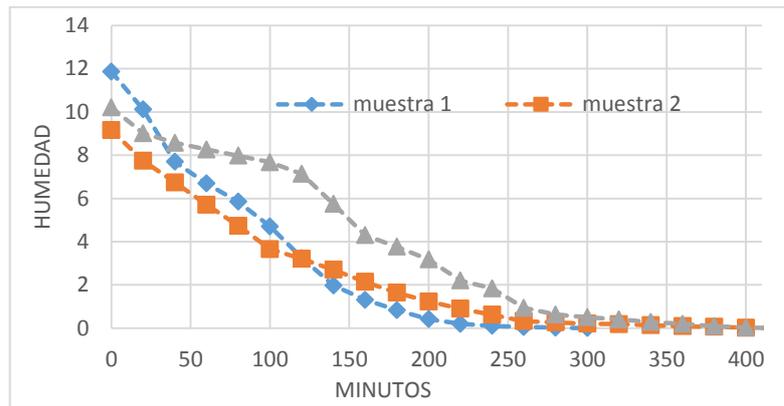


Gráfico 38: Uniformidad del contenido de humedad

Las variaciones en la humedad dentro del mismo tratamiento se originan del tamaño de los granos, en este caso los granos de café no son del mismo tamaño al inicio del proceso por lo que unos están más cargados de agua que otros y la fluidización se ve afectada dificultando la movilidad y así disminuye el coeficiente de transferencia de calor.

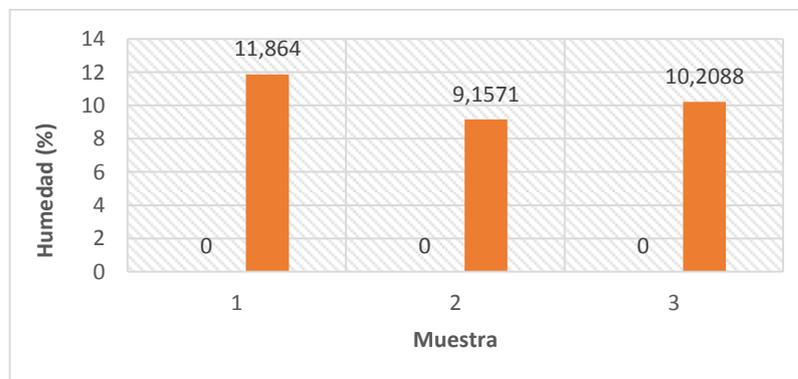


Gráfico 39: Uniformidad en el contenido de humedad

Fontal (2010), menciona que un café secado con la tecnología de lechos fluidizados utilizando un beneficiado mediante la tecnología Becolsub, presenta características sensoriales muy buenas; lo que nos permite corroborar que en un proceso de secado de café en lecho fluidizado no se alteran las características organolépticas del producto por el contrario, es muy posible que se contribuya a mejorarlas.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.6 CONCLUSIONES

1. Para permitir el control del proceso se determinó las propiedades físicas y gasodinámicas de los granos de café. Presentando formas esféricas casi perfectas con tamaños de grano de 0,55 cm de radio, los mismos que son capaces de fluidizar a una velocidad mínima de 2,38 m/s., con una porosidad límite del 48% antes de ser arrastrados por el flujo de aire fuera del reactor.
2. En el proceso de secado de café en lecho fluidizado, la velocidad del aire tuvo mayor efecto sobre el tiempo de secado, con relación a la temperatura de secado, donde los incrementos desde 3,9 a 5,5 m/s permitió disminuir los tiempos desde 300 a 51 minutos TAU. Mientras, los incrementos de temperaturas desde 40° a 50°C tuvo un menor efecto en la disminución del tiempo de secado.
3. La utilización del secado en lecho fluidizado permitió establecer tiempos de secado 10 veces menores que el método convencional en lecho fijo. El tiempo mínimo logrado fue de 240 min (4 horas aproximadamente), bajo las condiciones del mejor tratamiento.
4. Las pulsaciones en el flujo de aire aplicadas al mejor tratamiento no tuvo influencia en la disminución del tiempo de secado, por el contrario se

incrementó, debido a que provoca una interrupción en la transferencia de calor al producto.

5. Para actividad de agua se determinó valores que están dentro del rango de inhibición del desarrollo microbiano como lo establecen las normas de secado de café.
6. Se logró una alta homogeneidad del grano seco de café, con diferencias menores a 1% de humedad.

4.7 RECOMENDACIONES

1. Tomando en cuenta las características físicas de la materia prima se recomienda realizar una selección minuciosa de la misma, ya que al homogenizar las características aerodinámicas de las partículas sólidas se está contribuyendo a una mejor movilidad y dispersión dentro del reactor, por lo tanto el proceso será más eficiente.
2. Para poner en práctica este tipo de deshidratado intensivo se recomienda que la temperatura del aire de secado esté en niveles de entre 40 y 50° C, para evitar que se produzcan cambios degenerativos en el café y así afecten su calidad.
3. Con respecto al secador utilizado, se recomienda aislar las cubiertas de las zonas de calentamiento del aire, para no perder energía a través de las paredes, además de la utilización de un deshumificador del aire ambiente para no tener problemas de subidas y bajadas de humedad relativa, las cuales pueden afectar durante el proceso.

CAPÍTULO VI

BIBLIOGRAFÍA

1. Aldaco, R., Irabien, A., & Luis, P. (2005). Fluidized bed reactor for fluoride removal. *Chemical Engineering Journal*, 107(1), 113-117.
2. Aspurz Tabar, J. (2011). *Obtención de curvas de secado de tomillo (Thymus vulgaris)*. Retrieved from Minas Gerais-Brasil:
3. Calle Benites, R. E., & Aparicio Baidal, J. J. (2011). *Diseño de una planta de deshidratación de hierbas aromáticas*. Retrieved from Guayaquil:
4. Casp Vanaclocha, A., and Abril Requena, José. (2008). *Procesos de conservación de alimentos (2a. ed.)*. España: Mundi-Prensa.
5. Contreras, M., Carolina. (2006). *Influencia del método de secado en parámetros de calidad relacionados con la estructura y el color de manzana y fresa deshidratada*. Retrieved from Valencia:
6. Cornejo, A., & Vinicio, M. (2012). *Alternativas Agroecológicas para el manejo del café (coffea arabica)*.
7. Domínguez, F. V. C. (2006). El método de las líneas y su aplicación en problemas de ingeniería de alimentos: secado en lechos fluidizados. *Investigación Universitaria Multidisciplinaria: Revista de Investigación de la Universidad Simón Bolívar*(5), 6.
8. Figura Ludger, T. A. A. (2007). *Food physics: physical properties-measurement and applications*: Springer Science & Business Media.
9. Flores, I. P., & de Jesús, M. (2011). *Efecto del secado por lecho fluidizado en la estructura de semillas de Ricinus communis y en la extracción de su aceite como fuente alternativa de biocombustibles*.

10. Fontal, L., & Mauricio, E. (2010). Secado de café en lecho fluidizado. *Ingeniería e Investigación; Vol. 26, núm. 1 (2006); 22-26 Ingeniería e Investigación; Vol. 26, núm. 1 (2006); 22-26 2248-8723 0120-5609.*
11. Ibarz, A., & Barbosa Cánovas, G. V. (2014). *Introduction to Food Engineering*: Crcpres.
12. Ibarz, A., & Ribas, A. I. (2005). *Operaciones unitarias en la ingeniería de alimentos*: Mundi-Prensa Libros.
13. Isemin, R. L., Mikhalev, A. V., Viryasov, D. M., & Kuzmin, S. N. (2010). *Predicting of minimum fluidization velocity of a binary density system using pressure fluctuation in a fluidized bed*. Paper presented at the Proceedings of the European conference of chemical engineering, and European conference of civil engineering, and European conference of mechanical engineering, and European conference on Control.
14. Jangam, S., Law, C., & Mujumdar, A. (2010). *Drying of foods, vegetables and fruits*. Canada: Copyright.
15. Jaramillo Calle, A. M., & Narváez Quiranza, E. R. (2012). *Diseño y construcción de un secador de grano por fluidización e implementación del control de flujo y temperatura*. QUITO/EPN/2012.
16. Maupoey, P. F., Andrés Grau, A. M., Barat Baviera, J. M., & Albors Solora, A. M. (2001). *Introducción al Secado de Alimentos por Aire Caliente*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
17. Medina Micolta, M., & Luna Merchán, R. (2013). Análisis de la cadena del café y estrategia de mejoras para el sector caficultor en la Provincia de Manabí Cantón Jipijapa Parroquia Pedro Pablo Gómez.
18. Mohsenin, N. N. (1970). Physical properties of plant and animal materials. Vol. 1. Structure, physical characteristics and mechanical properties. *Physical properties of plant and animal materials. Vol. 1. Structure, physical characteristics and mechanical properties., 1.*
19. Montilla, J., Arcila, J., Aristizabal, M., Montoya, E., Puerta, G., Oliveros, C., & Cadena, G. (2013). Propiedades físicas y factores de conversión del café en el proceso de beneficio.
20. Mujumdar, A., & Law, C. L. (2006). Fluidized bed drying.

21. Nava, J. R. D. (2004). Estudio experimental del efecto de la porosidad de partículas sobre el proceso de secado en un lecho fluidizado a vacío empleando aire.
22. Ocon García, J., & Tojo Barreiro, G. (1980). *Problemas de Ingeniería Química. Tomo I*: Aguilar.
23. Olivo Peñaranda, C. R., & Silva Cueva, A. F. (2009). Diseño y construcción de una clasificadora de café según Norma INEN 285: 2006.
24. Ponce, C., Dolores, M., & Mejía Coronel, M. T. (2002). Proyecto de producción de café orgánico para exportación como una nueva alternativa comercial para Ecuador.
25. Puerta, G. (2013). La humedad controlada del grano preserva la calidad del café.
26. Ramos, P., Sanz, J., & Oliveros, C. (2014). Identificación y clasificación de frutos de café en tiempo real a través de la medición de color.
27. Reyes Salinas, A. (2010). *Escurrecimiento de fluidos: aplicaciones*. Chile: Editorial de la Universidad de Santiago de Chile.
28. Rocha, S., & Taranto, O. (2008). 6 Advances in Spouted Bed Drying of Foods. *Advances in Food Dehydration*, 153.
29. Sahin, S., Sahin, S. G., Sumnu, S. G., Cabra, S., López, A., Cabra, P. S., . . . Colombres, C. L. (2006). *Propiedades físicas de los alimentos*: Acribia.
30. Scribd, I. (Producer). (2016). Secado. *Teoría y Modelación Matemática*. Retrieved from [https://es.scribd.com/doc/118881519/SECADO- Teoria- y- Modelacion- matematica](https://es.scribd.com/doc/118881519/SECADO-Teoria-y-Modelacion-matematica).
31. Shi, J., & Xue, J. (2009). *Application and development of osmotic dehydration technology in food processing*. *Advances in food dehydration*. New York.
32. Singh, P., & Heldman, D. (2014). *Introduction to food engineering*: El sirver.
33. Singh, R. P., & Heldman, D. R. (2009). *Introducción a la Ingeniería de los Alimentos*. España: Acribia, S.A.
34. Tovilla Morales, A. S., & Sandoval Torres, S. (2015). ResearchGate. *Transporte de masa y calor en agroalimentos deformables durante el*

secado por convección forzada. Retrieved from
<http://www.researchgate.net/publication/276268380>

35. Valdez, L. I. C. (2008). Estudio experimental del secado de maiz precocido en un lecho fluidizado con aire operado en condiciones de vacio.
36. Velásquez, H. J. C., Rodríguez, M. C., & Castaño, J. L. L. (2011). Secado de café en lecho fijo con intermitencia térmica y flujo de aire pulsado. *Rev. Fac. Nal. Agr. Medellín*, 64(2), 6247-6255.

CAPÍTULO VII

ANEXOS

Anexo 1: Determinación de humedad para el café

- **Humedad en base seca**

$$\text{Humedad en base seca (bs)} = \frac{\text{peso de agua}}{(\text{peso de producto} - \text{peso de agua})} * 100$$

- **Humedad en base húmeda**

$$\text{Humedad en base húmeda (bh)} = \frac{\text{peso de agua}}{\text{peso de producto}} * 100$$

Anexo 2: Condiciones del aire de secado (Tabla psicrométrica)



Figura 41: Condiciones del aire de secado

Bulbo seco	20° C
Humedad relativa	59,26%
Humedad absoluta	8,7g/kg
Presión de vapor	1,39kPa
Volumen	0,8421m3/kg
Entalpia	41,97KJ/kg
Punto de rocío	11,97° C
Bulbo húmedo	15,09° C
Bulbo seco	50° C
Humedad relativa	10,09%
Humedad absoluta	8,7g/kg
Presión de vapor	1,39kPa
Volumen	0,9278m3/kg
Entalphy	71,97KJ/kg
Punto de rocío	11,97° C
Bulbo húmedo	24,21° C

Tabla 41: características del aire desecante

Tratamiento	Temperatura bulbo seco	Temperatura de bulbo húmedo
1	27	20
2	26	18,5
3	24	16,5
4	21	17
5	22	18,5
6	25	18
7	26	19
8	22	18
9		
$\Sigma =$	193	145,5
MEDIA	24,13	18,19

Anexo 3: Cálculo de la velocidad de secado

$$R = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

Donde:

R=Velocidad de secado

Δx = Variación de humedad

Δt = Variación del tiempo

Anexo 4: Cálculo de la densidad

Peso muestra = 36,58g

Volumen Aceite = 82 ml

1. Se toma la muestra en una probeta
Volumen aparente muestra = 91 ml
2. Se introduce el aceite hasta cubrir los granos
Volumen aceite + volumen de la muestra = 96 ml
3. Se separa el aceite de los granos y se toma el valor del aceite
Volumen aceite restante = 34 ml
4. Se resta el volumen inicial de aceite para el volumen de aceite restante
 $82\text{ml} - 34\text{ml} = 48\text{ ml}$
5. Determinamos el volumen real de la muestra
 $96\text{ ml} - 48\text{ ml} = 48\text{ ml}$

Anexo 5: Cálculo del diámetro medio del grano

Debido a que no existe una fórmula específica para determinar las formas geométricas de los granos de café, se aplica la misma fórmula utilizada para determinar el diámetro de una esfera.

$$\text{Volumen total} = \text{granos} + \text{agua} = 236\text{ cm}^3$$

$$\text{Volumen agua} = 170\text{ cm}^3$$

$$\text{Diferencia volumen} = 236 - 170 = 66/100 = 0,66\text{cm}^3$$

$$\text{Vol. Esfera} = 4/3 * \pi R^3$$

$$r = \sqrt[3]{\left(\frac{3}{4}\right)V/\pi}$$

$$r = \sqrt[3]{(0,75 * 0,66)/3,1416}$$

$$R = 0,54\text{ cm}$$

Error relativo

$$Er = \frac{2cc}{66} * 100$$

$$Er = 3,3\%$$

$$\text{Volumen} = 66 \pm 2cm^3$$

Anexo 6: Cálculo de la porosidad

La porosidad del lecho de café para determinar la velocidad de arrastre, se determina con la siguiente ecuación.

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_a}{\rho_r}$$

$$\varepsilon = 1 - \frac{40}{76}$$

$$\varepsilon = \mathbf{0.48}$$

ρ_a = porosidad aparente

ρ_r = porosidad real

Obteniendo el valor $\varepsilon = 0,48$ para la porosidad del lecho fijo o de bulto

Anexo 7: Determinación del área de secado

Área total

$$At = 2AB + AL$$

$$At = 84,5\pi + 1300\pi$$

$$At = 1384,5 \pi cm^2$$

$$At = 4349,53 cm^2$$

$$At = 43,49m^2$$

Área Lateral

$$AL = 2\pi rh$$

$$AL = 2\pi(6,5)(100)$$

$$AL = 1300 \pi cm^2$$

Área de la base

$$AB = \pi r^2$$

$$AB = \pi(6,5)^2$$

$$AB = 42,25 \pi cm^2$$

Volumen

$$V = AB(h)$$

$$V = \pi r^2 h$$

$$V = \pi(6,5)^2(100)$$

$$V = \pi(42,25 cm^2)(100 cm)$$

$$V = 4225 \pi cm^3$$

Anexo 8: Uniformidad del contenido de humedad final

Tabla 42: Muestra 1 (base del lecho)

				BASE SECA
CAJA	MINUTOS	PESOS	PESO FINAL	W
39,0917	0	40,1515	40,0391	11,8640
39,0917	20	40,135	40,0391	10,1224
39,0917	40	40,112	40,0391	7,6947
39,0917	60	40,1025	40,0391	6,6920
39,0917	80	40,0945	40,0391	5,8476
39,0917	100	40,0837	40,0391	4,7076
39,0917	120	40,0698	40,0391	3,2404
39,0917	140	40,0578	40,0391	1,9738
39,0917	160	40,0515	40,0391	1,3088
39,0917	180	40,047	40,0391	0,8339
39,0917	200	40,043	40,0391	0,4117
39,0917	220	40,041	40,0391	0,2005
39,0917	240	40,0401	40,0391	0,1056
39,0917	260	40,0396	40,0391	0,0528
39,0917	280	40,0393	40,0391	0,0211
39,0917	300	40,0391	40,0391	0,0000

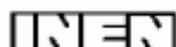
Tabla 43: Muestra 2 (mitad del lecho)

caja	Minutos	pesos	peso final	w
39,0091	0	40,1487	40,0531	9,1571
39,0091	20	40,134	40,0531	7,7490
39,0091	40	40,1235	40,0531	6,7433
39,0091	60	40,1127	40,0531	5,7088
39,0091	80	40,1025	40,0531	4,7318
39,0091	100	40,0913	40,0531	3,6590
39,0091	120	40,0866	40,0531	3,2088
39,0091	140	40,0813	40,0531	2,7011
39,0091	160	40,0755	40,0531	2,1456
39,0091	180	40,0702	40,0531	1,6379
39,0091	200	40,066	40,0531	1,2356
39,0091	220	40,0625	40,0531	0,9004
39,0091	240	40,0596	40,0531	0,6226
39,0091	260	40,0565	40,0531	0,3257
39,0091	280	40,0559	40,0531	0,2682
39,0091	300	40,0553	40,0531	0,2107
39,0091	320	40,055	40,0531	0,1820
39,0091	340	40,0545	40,0531	0,1341
39,0091	360	40,054	40,0531	0,0862
39,0091	380	40,0537	40,0531	0,0575
39,0091	400	40,0533	40,0531	0,0192
39,0091	420	40,0531	40,0531	0,0000

Tabla 44: Muestra 3 (superficie del lecho)

caja	Minutos	pesos	peso final	w
39,1074	0	40,7386	40,5875	10,2088
39,1074	20	40,721	40,5875	9,0197
39,1074	40	40,7144	40,5875	8,5737
39,1074	60	40,7098	40,5875	8,2630
39,1074	80	40,7056	40,5875	7,9792
39,1074	100	40,7011	40,5875	7,6752
39,1074	120	40,6931	40,5875	7,1347
39,1074	140	40,6725	40,5875	5,7429
39,1074	160	40,6511	40,5875	4,2970
39,1074	180	40,6432	40,5875	3,7633
39,1074	200	40,6345	40,5875	3,1755
39,1074	220	40,6201	40,5875	2,2026
39,1074	240	40,6147	40,5875	1,8377
39,1074	260	40,6014	40,5875	0,9391
39,1074	280	40,5968	40,5875	0,6283
39,1074	300	40,5949	40,5875	0,5000
39,1074	320	40,5935	40,5875	0,4054
39,1074	360	40,5905	40,5875	0,2027
39,1074	380	40,5888	40,5875	0,0878
39,1074	400	40,5878	40,5875	0,0203
39,1074	420	40,5875	40,5875	0,0000

Anexo 9: Norma INEN 285: 2006



INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN

Quito - Ecuador

NORMA TÉCNICA ECUATORIANA

NTE INEN 285:2006
Primera revisión

CAFÉ VERDE EN GRANO. CLASIFICACIÓN Y REQUISITOS

Primera Edición

GREEN COFFEE BEANS. CLASSIFICATION AND SPECIFICATIONS.

First Edition

DESCRIPTORES: Café, producto vegetal, producto agrícola, café verde, cosecha nueva, cosecha vieja.
AL:02.06-401
CDU:663.93
CIIU:63.10
ICS:67.140.20

<p>Norma Técnica Ecuatoriana Obligatoria</p>	<p>CAFÉ VERDE EN GRANO. CLASIFICACIÓN Y REQUISITOS</p>	<p>NTE INEN 285:2006 Primera revisión 2006-01</p>
<p style="text-align: center;">1. OBJETO</p> <p>1.1 Esta norma tiene por objeto establecer la clasificación y los requisitos del café verde en grano.</p> <p style="text-align: center;">2. ALCANCE</p> <p>2.2 Esta norma se aplica al café verde de las especies arábica y robusta para su comercialización.</p> <p style="text-align: center;">3. DEFINICIONES Y TERMINOLOGÍA</p> <p>3.1 Para los efectos de esta norma, se adoptan las definiciones contempladas en la NTE INEN 283 y las que a continuación se detallan:</p> <p>3.1.1 <i>Terminología general</i></p> <p>3.1.1.1 <i>Año cafetero.</i> Es el período de un año, desde el 1º de octubre hasta el 30 de septiembre.</p> <p>3.1.1.2 <i>Beneficio por la vía húmeda.</i> Es el procedimiento por el cual se obtiene el llamado café pergamino, a partir de las cerezas maduras, involucrando las actividades de despulpado, fermentado, lavado y secado.</p> <p>3.1.1.3 <i>Beneficio por vía seca.</i> Tratamiento que se da al café cereza y consiste en deshidratarlo, por medios naturales o artificiales, hasta un nivel en que puede ser llevado a la piladora para la eliminación física de las envolturas del almendro.</p> <p>3.1.1.4 <i>Café.</i> Es el término empleado para el fruto y/o granos provenientes de las plantas del género <i>Coffea</i>; así como, de los productos del procesamiento del grano destinados al consumo humano.</p> <p>3.1.1.5 <i>Café Especial.</i> Es aquel producto que se distingue de los demás por sus particulares características de taza, por las zonas donde se cultiva, por la tecnología de producción y procesamiento que se emplea, por su aporte en la conservación de la biodiversidad, por los principios solidarios que lo sustentan o por la preferencia de la demanda especializada.</p> <p>3.1.1.6 <i>Cosecha actual.</i> Período que no excede los 6 meses de iniciada la época de cosecha.</p> <p>3.1.1.7 <i>Cosecha vieja.</i> Período que excede los 6 meses de iniciada la época de cosecha.</p> <p>3.1.1.8 <i>Café bola seca.</i> Cerezas de café secadas con todas sus envolturas, al sol o mediante métodos artificiales.</p> <p>3.1.1.9 <i>Café cereza.</i> Es el fruto de los cafetos en su estado maduro. Las variedades arábicas Typica, Bourbon rojo, Caturra rojo, Catuai rojo, Pacas, Pache, Catimor, Sarchimor y Cavimor tienen cerezas de color rojo. Los frutos de las variedades Bourbon amarillo, Caturra amarillo y Catuai amarillo, en su estado maduro, tienen la referida coloración.</p> <p>3.1.1.10 <i>Café de estricta altura.</i> Café que se produce en las zonas de cultivo ubicadas arriba de los 1 200 metros sobre el nivel del mar.</p> <p>3.1.1.11 <i>Café de altura.</i> Café que se produce en las zonas de cultivo entre 800 y 1 200 metros sobre el nivel del mar.</p> <p style="text-align: right;"><i>(Continúa)</i></p> <hr/> <p>DESCRIPTORES: Café, producto vegetal, producto agrícola, café verde, cosecha nueva, cosecha vieja.</p>		

Anexo 10: Fotografías





Anexo 11: GLOSARIO DE SIMBOLOGÍA

X	Humedad
P_i	Peso total de material en un tiempo determinado
S'	Cantidad de sólidos secos
X^*	Contenido de humedad cuando se alcanza el equilibrio
R	La velocidad de secado
dX/dt	Variación del tiempo según la humedad en cada punto de la curva
A	Área de la superficie que se está secando
t	Tiempo
D_{eff}	Coefficiente de difusión
HR	Humedad relativa
d_v	Densidad del vapor de agua en el aire
d_s	Densidad del vapor de agua saturado a la temperatura de bulbo seco del aire
h_a	Humedad absoluta
a_w	Actividad de agua
P_a	Presión parcial de vapor de agua
P_{a0}	Presión de vapor de saturación del agua pura a la misma temperatura
MR	Razón de humedad
τ	Tiempo
q	Tasa de transferencia de calor
K_g	Conductividad térmica del gas
d_p	Diámetro de la partícula
ϕ	Esfericidad
V_e	Volumen del elipsoide triaxial con diámetros equivalentes
V_c	Volumen de la esfera circunscrita
V_p	Volumen de una partícula
ϵ	Porosidad
ρ_p	Densidad de la partícula

U_o	Velocidad superficial del gas
U_{mf}	Velocidad mínima de fluidización
U_t	Velocidad terminal
U_{mb}	Velocidad mínima de burbujeo
ϵ_m	Porosidad del lecho
r	Radio
ρ_a	Densidad aparente
ρ_r	Densidad real