

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y METALURGIA**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**TESIS**

**“EVALUACIÓN DE SECADORES SOLARES DE TIPO  
INDIRECTO EN EL RENDIMIENTO DE LA PRODUCCIÓN  
DE PAPA SECA”**

**PRESENTADO POR:**

**Bach. ALFREDO GUSTAVO BRAVO CAUNA**

Para optar el Título Profesional de

**INGENIERO QUÍMICO**

**AYACUCHO – PERÚ**

**2 018**



## DEDICATORIA

En memoria a mi madre y padre:

**María Natividad y Demétrio**

A mis preciados hijos:

***Ruth, Vrydma y Rualth,***

por brindarme cotidianamente

solo felicidad.

A **Ruth**, mi esposa:

Invalorable en su aporte y apoyo.

Sensata, perseverante, firme y

maternal en su comprensión y amor.

A mis hermanos:

**Yolanda, Víctor y Aquiles**

Recuerdo vivo de mis padres.

## AGRADECIMIENTOS

A mi *alma mater*, la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, que en su seno, la Facultad de Ingeniería Química y Metalurgia, a través de la Escuela Profesional de Ingeniería Química, me permitieron imprimir la fuerza de vitalidad intelectual, en la profesión de Ingeniero Químico, gracias a una gama de profesionales de alto nivel académico, de quienes me enorgullezco ser su discípulo, dado que promovieron conocimientos, con un soporte técnico-científico solvente, que se justifica culturalmente; sin embargo, obligatorio en la coyuntura política - económica mundial actual, manifestadas en las corrientes de reingeniería, calidad total, excelencia, competitividad y la innovación; sumándose a estas exigencias, el dinámico campo del desarrollo tecnológico, de la cibernética, la mecatrónica, la física nuclear, la ingeniería genética que ha encontrado nuevas formas de reproducción (*clonación*), los vuelos cósmicos, que ha permitido trasladar a los humanos prácticamente a otros planetas y en especial a Marte, sugiriendo la posibilidad de hacerla habitable pronto. Y el cada vez creciente mundo de la ciencia, como la relatividad, la mecánica cuántica, la geometría fractal, entre otros. Pero, todo este monstruoso avance, al parecer no repercute ni favorece al ciudadano común y corriente. De allí, la necesidad de aportar con este modesto trabajo, con recursos del Universo que pertenecen a la humanidad, para el beneficio de ella.

De manera especial, también me permito expresar, mi gratitud y agradecimientos al apoyo y conducción especializada de mi asesor el Ing. Bernardo Enciso López, asimismo mi reconocimiento a su magistral orientación de los docentes y amigos del Laboratorio de Transferencia de Masa, y su apoyo amigable en los aspectos técnicos, teóricos y operativos que me permitieron efectivizar este trabajo.

Finalmente, mis sinceros reconocimientos, a los diversos profesionales y amistades que, incondicionalmente han contribuido en la ejecución y consolidación del presente trabajo de tesis.

A. G. BRAVO C.

# CONTENIDO

DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
ÍNDICE	v
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABLAS	ix
LISTA DE ANEXOS	x
SIMBOLOGÍA	xi
RESUMEN	xiii
ABSTRACT	xiv
INTRODUCCIÓN	xv

## CAPÍTULO I

1	GENERALIDADES	17
1.1	PROBLEMA	17
1.1.1	Descripción contextual	18
1.1.2	Delimitación del problema	20
1.1.3	Formulación del problema	20
1.2	OBJETIVOS	21
1.3	JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA	22
1.4	HIPÓTESIS	23

## CAPÍTULO II

2	FUNDAMENTO TEÓRICO	25
2.1	ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS	25
2.2	ENERGÍA SOLAR	27
2.2.1	El Sol	28
2.2.2	Radiación Solar	29
2.2.3	Irradiación e irradiancia	30
2.2.4	Mapas solares	31
2.2.5	Variaciones de la radiación sobre la tierra	33
2.2.6	Radiación solar en el Perú	34
2.2.7	Energía solar fototérmica	35
2.3	LA PAPA	37
2.3.1	Taxonomía de la papa	37
2.3.2	Descripción general	38
2.3.3	Propiedades de la papa	38
2.3.4	Variedades de la papa en el Perú	40
2.3.5	Producción de la papa en el Perú y en Ayacucho	42
2.3.6	Aplicaciones de la papa	43
2.3.7	Papa seca	44
2.3.8	Proceso de producción de papa seca	45
2.4	SECADO	47
2.4.1	Secado de sólidos	47
2.4.2	Caracterización de sólidos húmedos	48
2.4.3	Velocidad y tiempo de secado	50
2.4.4	Características del aire de secado	53
2.4.5	Factores que intervienen en el proceso de secado	53
2.4.6	Balace de materia y energía en el secado de sólidos	54
2.4.7	Sistemas de secado	56
2.4.8	Clasificación de secadores	57
2.5	SECADORES SOLARES	58

2.5.1	Secador solar indirecto .....	59
2.5.2	Colector solar .....	60
2.5.3	Cámara de secado .....	63
2.5.4	Aspectos constructivos de secadores solares .....	64
2.5.5	Costos de inversión y operativos .....	67
2.5.6	Parámetros del secador solar indirecto .....	68

### **CAPÍTULO III**

3	METODOLOGÍA .....	71
3.1	METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN .....	71
3.2	DISEÑO DE FACTORES PARA LA EXPERIMENTACIÓN .....	77
3.3	DESCRIPCIÓN BÁSICA DE TÉCNICAS UTILIZADAS .....	77
3.4	MATERIALES Y EQUIPOS .....	78

### **CAPÍTULO IV**

4	RESULTADOS EXPERIMENTALES .....	80
4.1	PROCESO DE SECADO DE LA PAPA .....	80
4.1.1	Variedad de papa como materia prima .....	80
4.1.2	Caracterización de la materia prima .....	81
4.1.3	Proceso de elaboración y producción de papa seca .....	82
4.1.4	Requerimientos de energía térmica del proceso .....	90
4.2	DESCRIPCIÓN DEL SECADOR SOLAR INDIRECTO .....	93
4.2.1	Referentes de secadores solares indirectos .....	93
4.2.2	Descripción dimensional del secador solar indirecto .....	95
4.2.3	Características del colector solar plano .....	96
4.2.4	Características de la cámara de secado .....	98
4.2.5	Características ambientales para la operación del equipo .....	100
4.2.6	Operación y evaluación del colector .....	101
4.2.7	Operación y evaluación de la cámara de secado .....	103
4.2.8	Operación del secador solar indirecto con carga de prueba .....	105
4.3	EVALUACIÓN DEL SECADOR SOLAR INDIRECTO .....	108
4.3.1	Factores de evaluación del secado solar indirecto .....	108
4.3.2	Características de las bandejas y carga de sólidos en el secador .....	110
4.3.3	Evaluación del secado solar indirecto de acuerdo a los factores .....	112
4.4	CARACTERIZACIÓN DE LA PAPA SECA .....	119

### **CAPÍTULO V**

5	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN .....	121
5.1	CONVERSIÓN DE LA ENERGÍA SOLAR EN ENERGÍA TÉRMICA .....	121
5.1.1	Evaluación térmica del colector solar .....	121
5.1.2	Evaluación térmica de la cámara de secado .....	125
5.2	EVALUACIÓN DEL SECADO DE PAPA EN EL SECADOR SOLAR INDIRECTO .....	126
5.2.1	Curvas de secado .....	126
5.2.2	Velocidad de secado .....	128
5.2.3	Características del aire caliente durante el secado .....	130
5.2.4	Análisis de los factores evaluados en el secado .....	135
5.2.5	Energía térmica neta para el secado de la papa .....	140
5.2.6	Tiempo de secado total .....	141
5.3	RENDIMIENTO PRODUCTIVO DE LA PAPA SECA .....	142
	CONCLUSIONES .....	144
	RECOMENDACIONES .....	145
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	146
	ANEXO .....	150

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.1</b>	Energía solar incidente en la región de Ayacucho ( <a href="http://deltavolt.pe">http://deltavolt.pe</a> ) .....	19
<b>Figura 2.1</b>	Estructura del Sol ( <a href="http://www.revista.unam.mx/">http://www.revista.unam.mx/</a> ).....	28
<b>Figura 2.2</b>	Vías de recepción de la energía solar en una superficie colectora ( <a href="http://calculationsolar.com/blog/">http://calculationsolar.com/blog/</a> ).....	29
<b>Figura 2.3</b>	Mapa solar de irradiancia global horizontal para el Perú, 1999 – 2015 (SOLARGIS, 2017).....	31
<b>Figura 2.4</b>	Mapa de irradiación solar promedio recibida por la región de Ayacucho, en $\text{kW.h/m}^2$ (SENAMHI, 2003).....	32
<b>Figura 2.5</b>	Trayectoria e incidencia del rayo solar de acuerdo a las estaciones y la hora(Mendoza, 2011).....	33
<b>Figura 2.6</b>	Inclinación del colector y paneles solares de acuerdo al ángulo de incidencia solar ( <a href="http://antusol">http://antusol</a> ).....	34
<b>Figura 2.7</b>	Componentes de un secador solar indirecto con aprovechamiento de energía fototérmica. ....	36
<b>Figura 2.8</b>	Morfología de una planta de papa.....	38
<b>Figura 2.9</b>	Producción de papa por regiones en el Perú y en Ayacucho para el año 2016 (MINAGRI, 2017). ....	42
<b>Figura 2.10</b>	Diagrama del proceso de producción para obtener la papa seca. ....	46
<b>Figura 2.11</b>	Humedad de equilibrio de algunos sólidos en aire (Geankoplis, 1998; Arun, 2006) 49	
<b>Figura 2.12</b>	Curva de secado para la disminución de la humedad absoluta del sólido en el tiempo (Treybal, 1968).....	50
<b>Figura 2.13</b>	Curva típica de velocidad de secado de un sólido bajo condiciones de secado constantes (Treybal, 1968).....	52
<b>Figura 2.14</b>	Esquema básico de un secador directo que usa aire caliente como agente de secado. ....	57
<b>Figura 2.15</b>	Clasificación de secadores de acuerdo al mecanismo de transferencia de calor hacia el sólido. ....	57
<b>Figura 2.16</b>	Esquema típico de un secador solar indirecto con un colector y cámara de secado con bandejas.....	59
<b>Figura 2.17</b>	Componentes básicos de un colector solar plano.....	61
<b>Figura 2.18</b>	Gráficos normalizados del rendimiento de un colector solar (PROGENSA, 2009) 62	
<b>Figura 2.19</b>	Esquema de la cámara de secado conectado al aire caliente ascendente y distribución de bandejas. ....	63
<b>Figura 2.20</b>	Bandeja rectangular perforada, que se disponen al interior de la cámara de secado. ....	67
<b>Figura 4.1</b>	Diagrama del proceso de producción de la papa seca, para la variedad Canchán. 85	
<b>Figura 4.2</b>	Diagrama del proceso de producción de la papa seca, para la variedad Yungay. .86	
<b>Figura 4.3</b>	Dimensionamiento de un secador solar prototipo propuesto por Vidal (2012). ....	94
<b>Figura 4.4</b>	Descripción dimensional del secador solar prototipo usado para la investigación. (a) Vista perfil. (b) Vista isométrica.....	95
<b>Figura 4.5</b>	Superficie colectora o recepción de energía solar instalada en el colector solar (CS1).....	96
<b>Figura 4.6</b>	Incremento del área del colector solar plano, como una segunda alternativa de estudio (CS2). ....	97
<b>Figura 4.7</b>	Aspecto mecánico de la compuerta móvil que permite la conmutación del aire caliente en función al área del colector solar plano de CS1 a CS2.....	98
<b>Figura 4.8</b>	Dimensiones del armario de la cámara de secado interconectado al colector solar. 99	
<b>Figura 4.9</b>	Vista fotográfica lateral del secador solar indirecto con cubierta de vidrio en el colector solar. ....	99
<b>Figura 4.10</b>	Vista fotográfica del secador solar indirecto mostrando detalles internos de la cámara de secado.....	100
<b>Figura 4.11</b>	Perfil de temperaturas en el funcionamiento del colector solar plano. ....	102
<b>Figura 4.12</b>	Perfil de temperaturas en el funcionamiento de la cámara de secado.....	104

<b>Figura 4.13</b>	Perfil de disminución del peso de papa húmeda durante el secado solar indirecto. 105	
<b>Figura 4.14</b>	Perfil de disminución del % de humedad (bh)de la papa durante el secado solar indirecto. ....	106
<b>Figura 4.15</b>	Perfil de disminución de la humedad absoluta en la papa: $X$ ( $\text{kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{sól. seco}}$ ) durante el secado solar indirecto. ....	106
<b>Figura 4.16</b>	Variación de la velocidad de secado en función al tiempo. ....	107
<b>Figura 4.17</b>	Curva de velocidad de secado en función a la humedad absoluta en base seca. 108	
<b>Figura 4.18</b>	Dimensiones de la bandeja de secado, <b>(a)</b> marco de soporte y <b>(b)</b> malla para extender las papas. ....	110
<b>Figura 4.19</b>	Ubicación de la bandeja tipo malla en el interior de la cámara de secado, portando los trozos de papa. ....	111
<b>Figura 5.1</b>	Variación del calor útil instantáneo en el arranque y estabilización del colector solar (CS1). ....	123
<b>Figura 5.2</b>	Disminución del porcentaje de humedad (base húmeda) durante el secado de papa en convección natural (Ref. E01). ....	127
<b>Figura 5.3</b>	Disminución de la humedad absoluta (base seca) durante el secado de papa en convección natural (Ref. E01). ....	127
<b>Figura 5.4</b>	Variación de la velocidad de secado durante el tiempo de evaluación en convección natural (Ref. E01). ....	128
<b>Figura 5.5</b>	Curva de secado: $X$ ( $\text{kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{sol seco}}$ ) vs $R$ ( $\text{kg}_{\text{agua}}/\text{m}^2.\text{h}$ ) en convección natural (Ref. E01). ....	129
<b>Figura 5.6</b>	Perfiles de temperatura obtenidas durante el secado de papa en convección natural (Ref. E01). ....	131
<b>Figura 5.7</b>	Trayectoria del calentamiento y de la humidificación adiabática del aire en el secador solar indirecto (Ref. E01). ....	134
<b>Figura 5.8</b>	Variación del % de Humedad relativa del aire húmedo que abandona la cámara de secado (Ref. E01). ....	135
<b>Figura 5.9</b>	Variación del peso de las variedades de papa Canchán y Yungay, por secado con convección natural (Ref. E01 y E02). ....	136
<b>Figura 5.10</b>	Influencia del incremento del área del colector solar sobre el secado de papa Canchán en convección natural (Ref. E01 y E05). ....	137
<b>Figura 5.11</b>	Influencia del tipo de convección natural y forzada sobre la curva de secado de papa Canchán en el CS1 (Ref. E01 y 03) ....	139



## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 2.1</b>	Estimación de la radiación solar diaria en la media mensual por regiones del Perú. (Orbegozo,2010).....	34
<b>Tabla 2.2</b>	Factores de inclinación determinados para el Perú. (Orbegozo, 2010).....	35
<b>Tabla 2.3</b>	Composición química del tubérculo de papa (Arun, 2006).....	39
<b>Tabla 2.4</b>	Composición básica típica de papa fresca por cada 100 g de porción comestible (Arun, 2006).....	40
<b>Tabla 2.5</b>	Variedades y calibres de papa de acuerdo al tamaño para su comercialización....	41
<b>Tabla 2.6</b>	Composición química de la papa seca como alimento, en base a 100 g. ....	45
<b>Tabla 2.7</b>	Comparación entre los grupos de colectores solares.....	60
<b>Tabla 4.1</b>	Evaluación de las características dimensionales de las variedades de papa utilizada como materia prima.....	81
<b>Tabla 4.2</b>	Evaluación de las características físicas y otros de la materia prima fresca.....	82
<b>Tabla 4.3</b>	Características ambientales generales promedios asociadas a la zona de trabajo.....	101
<b>Tabla 4.4</b>	Características del brillo solar asociadas a la zona de trabajo.....	101
<b>Tabla 4.5</b>	Factores y alternativas de evaluación en la investigación del secado solar de papa.....	109
<b>Tabla 4.6</b>	Características de las bandejas utilizadas y disponibilidad del área de secado. ..	111
<b>Tabla 4.7</b>	Diseño experimental del secado solar de papa de acuerdo a variables y factores.....	113
<b>Tabla 4.8</b>	Características principales del equipo y la papa húmeda en trozos sometida al secado solar indirecto.....	113
<b>Tabla 4.9</b>	Evaluación del secado solar indirecto (CS1) de papa Canchán, por convección natural (E01).....	114
<b>Tabla 4.10</b>	Evaluación del secado solar indirecto (CS1) de papa Yungay, por convección natural (E02).....	114
<b>Tabla 4.11</b>	Evaluación del secado solar indirecto (CS1) de papa Canchán, por convección forzada (E03).....	115
<b>Tabla 4.12</b>	Evaluación del secado solar indirecto (CS1) de papa Yungay, por convección forzada (E04).....	115
<b>Tabla 4.13</b>	Evaluación del secado solar indirecto (CS2) de papa Canchán, por convección natural (E05).....	116
<b>Tabla 4.14</b>	Evaluación del secado solar indirecto (CS2) de papa Yungay, por convección natural (E06).....	116
<b>Tabla 4.15</b>	Evaluación del secado solar indirecto (CS2) de papa Canchán, por convección forzada (E07).....	117
<b>Tabla 4.16</b>	Evaluación del secado solar indirecto (CS2) de papa Yungay, por convección forzada (E08).....	117
<b>Tabla 4.17</b>	Caracterización de la papa seca obtenida.....	120
<b>Tabla 5.1</b>	Determinación de la humedad crítica y velocidad de secado constante para los ensayos de papa seca.....	130
<b>Tabla 5.2</b>	Calor neto requerido por la carga sólida para el secado adiabático en la cámara de secado solar.....	140
<b>Tabla 5.3</b>	Variación de % de humedad (base húmeda) de la carga de papas y tiempo de secado.....	141
<b>Tabla 5.4</b>	Rendimiento de producción de la papa seca de acuerdo a la variedad procesada.....	142

## LISTA DE ANEXOS

ANEXO 1	Diagrama Psicrométrico para la ciudad de Ayacucho .....	150
ANEXO 2.	Curvas de secado básico resultantes para cada ensayo desarrollado. ....	151
ANEXO 3	a) Vista fotográfica del Secador Solar del trabajo de Investigación	
	b) Vista fotográfica de la Cámara de Secado del Secador Solar del trabajo de Investigación .....	159
ANEXO 4	Cálculo del $f_c$ por el método de la cuadrícula.....	161
ANEXO 5	Juego de fotos del proceso productivo y del Secador Solar .....	162

## SIMBOLOGÍA

A	Área del sólido expuesto al secado con el gas (m <sup>2</sup> )
A <sub>C</sub>	Área del colector solar plano (m <sup>2</sup> )
A <sub>CS1</sub>	Área o superficie negra del colector solar plano
A <sub>f</sub>	Área de flujo de aire que sale del colector
C <sub>p</sub>	Calor específico del aire
C <sub>p<sub>aire</sub></sub>	Calor específico del aire
C <sub>pL</sub>	Calor específico del líquido (agua) (kcal/kg <sub>a</sub> .°C)
C <sub>pp</sub>	Calor específico de la papa fresca (lavada)
C <sub>ps</sub>	Calor específico de la materia seca o matriz sólida
C <sub>p<sub>v</sub></sub>	Calor específico del vapor de agua
C <sub>p<sub>w</sub></sub>	Calor específico del agua líquida
C <sub>p<sub>w</sub></sub>	Calor específico del agua líquida
ΔT	Diferencia de temperatura del aire (t <sub>2</sub> – t <sub>1</sub> )
F	Carga de material sólido húmedo en la cámara de secado (g, kg)
fc	Factor de carga de sólidos sobre la bandeja
G <sub>p</sub>	Flujo de gas portante o aire seco (Q/V)
% hum <sub>F</sub>	Porcentaje de humedad inicial (base húmeda)
%h	Porcentaje de humedad del material sólido húmedo
H	Entalpía específica del sólido húmedo (kcal/kg <sub>s</sub> .°C)
H <sub>R</sub>	Humedad relativa del aire (%)
η	Eficiencia del colector.
η <sub>0</sub>	Eficiencia máxima o factor óptico
I	Radiación solar global por día (kW.h/m <sup>2</sup> .día)
k <sub>1</sub> , k <sub>2</sub>	Coeficientes de pérdida
λ <sub>ω</sub>	Calor latente de vaporización del agua a t <sub>eb</sub>
m <sub>A</sub>	Masa de agua contenida en el material sólido húmedo
m <sub>aire</sub>	Flujo másico de aire que atraviesa el colector solar
m <sub>ev</sub>	Agua evaporada durante la cocción
m <sub>s</sub>	Masa de materia seca o matriz sólida contenida en el material sólido húmedo
m <sub>uh</sub>	Peso de sólido húmedo a procesarse o cargarse en el secador
N	Número de bandejas utilizadas
Q	Caudal volumétrico del aire a través del colector
Q <sub>1</sub>	Calentamiento de la matriz sólida o sólido portante
Q <sub>2</sub>	Calentamiento inicial del agua del sólido hasta la temperatura de interface sólido gas del periodo antecrítico
Q <sub>3</sub>	Calor para la evaporación del agua eliminado en el secado
Q <sub>4</sub>	Recalentamiento del agua residual hasta la temperatura de descarga del sólido
Q <sub>5</sub>	Recalentamiento del vapor desprendido en la interface hasta la temperatura del aire vigente en la cámara de secado
Q <sub>asc<sub>s</sub></sub>	Caudal del aire caliente a la salida del colector solar
Q <sub>nc</sub>	Calor neto para la cocción de la papa
q <sub>u</sub>	Flujo de calor útil generado por el colector solar (kW)
R	Velocidad de secado del sólido húmedo (kg <sub>a</sub> /m <sup>2</sup> .h)
ρ <sub>α</sub>	Densidad aparente del sólido a cargarse en las bandejas
ρ <sub>ε<sub>ptα</sub></sub>	Densidad del aire (caliente)
Sp	Sólido seco o materia seca (kg <sub>s</sub> )
Sp = m <sub>s</sub>	Sólido portante o materia seca
T	Temperatura del sólido húmedo (°C)
t	Tiempo de secado transcurrido (h)
T <sub>0</sub>	Temperatura de referencia (» 0 °C)
T <sub>Op</sub> »T <sub>0w</sub>	Temperatura inicial del agua/para fresca
T <sub>a</sub>	Temperatura del ambiente exterior
T <sub>aec</sub>	Temperatura media del aire caliente que entra a la cámara de secado
T <sub>aecs</sub>	Temperatura media del aire que entra al colector solar
T <sub>amb</sub>	Temperatura media del aire ambiental
T <sub>asc</sub>	Temperatura media del aire húmedo a la salida de la cámara.
T <sub>asc<sub>s</sub></sub>	Temperatura media del aire que sale del colector solar

$T_{eb}$	Temperatura de ebullición del agua en la localidad
$T_{ecs}$	Temperatura media del aire que entra a la cámara
$T_F$	Temperatura inicial del sólido cargado a la cámara
$T_g$	Temperatura del gas de secado en la cámara
$T_{IS}$	Temperatura de la interface sólido gas
$T_m$	Temperatura media del colector
$T_{scs}$	Temperatura media del aire que sale de la cámara
$T_W$	Temperatura final de descarga del sólido
$V$	Volumen húmedo específico del aire
$v_{asc}$	Velocidad media del aire húmedo a la salida de la cámara
$v_{ascS}$	Velocidad media del aire caliente
$V_S$	Volumen de sólido húmedo a cargarse
$W$	Sólido seco total obtenido (22,1 kg + 0,4 kg en pérdidas)
$x$	Fracción másica de agua o humedad del sólido
$X$	Humedad absoluta o en base seca ( $kg_a/kg_s$ )
$x_F$	Fracción másica unitaria de agua (humedad) en la carga inicial
$X_F$	Humedad absoluta inicial del sólido ( $kg_w/kg_s$ )
$x_W$	Fracción de la humedad final del sólido (9 %)
$X_W$	Humedad absoluta final del sólido ( $kg_w/kg_s$ )

## RESUMEN

Con respecto a la producción de la papa (*solanum tuberosum*), la región de Ayacucho aporta con el 6,7 % a la producción nacional, con un registro de 304,2 mil toneladas para el año 2016, constituidos principalmente por las variedades mejoradas de papa, tipo Canchán y Yungay (INIA, 2010). Asociándose a esta condición, la radiación solar en la región de Ayacucho, que prácticamente es permanente durante todo el año, con cielos despejados y un alto nivel de incidencia solar predominantemente entre las nueve de la mañana a tres de la tarde, admitiéndose un valor medio de irradiación solar de 6 kW.h/m<sup>2</sup>-día, que equivalen a una disponibilidad promedio de energía solar incidente de 250 W/m<sup>2</sup> sobre la superficie del colector, en el propósito de evaluar el colector solar plano. Esta disposición de energía solar implica un bajo costo, asociado a la incorporación de las tecnologías limpias con responsabilidad ambiental, que hacen viables el uso de las energías renovables.

Para la realización del presente trabajo, se evaluaron dos secadores solares de tipo indirecto, compuesto por el colector solar plano y la cámara de secado interconectados en una instalación fija; las dimensiones de una caja rectangular de 0,79 m x 2,57 m con 16 cm de altura interna, para el flujo ascensional del aire, constituye un primer colector solar de 1,92 m<sup>2</sup> de superficie, denominado como CS1 y el segundo con incremento de área lateral, en ambos lados del colector CS1, que suma una superficie de 3,84 m<sup>2</sup> denominado colector solar CS2; mientras que, las dimensiones de la cámara de secado es de 0,779 m x 0,665 m de sección y con 0,94 m de altura en la parte frontal y 1,07 m al posterior, con capacidad de portar hasta cuatro bandejas tipo malla, de 0,348 m<sup>2</sup> de área de carga de sólidos húmedos por cada bandeja.

Respecto al rendimiento de la producción de papa seca, determinado en el proceso de producción global, referida a las dos variedades de papa evaluadas, fueron de 21,9 % para la variedad Canchán y de un 23,4 % para la variedad Yungay.

Finalmente, el rendimiento de la transformación de energía aprovechable, de la irradiación solar incidente sobre el colector del secador solar, que genera el calentamiento del aire, es de un promedio del 62,5 %, que responde a la evaluación del colector solar operando en un día normal.

**Palabras clave:** Secador solar indirecto, papa seca, secado.

## ABSTRACT

With respect to the production of potatoes (*solanum tuberosum*), the Ayacucho region contributes 6,7 % to the national production, with a record of 304,2 thousand tons for 2016, consisting mainly of improved varieties of papa, type Canchán and Yungay (INIA, 2010). Associating with this condition, solar radiation in the Ayacucho region, which is virtually permanent throughout the year, with clear skies and a high level of solar incidence predominantly between nine in the morning to three in the afternoon, admitting an average value of solar irradiation of 6 kW.h / m<sup>2</sup>-day, equivalent to an average availability of incident solar energy of 250 W / m<sup>2</sup> on the surface of the collector, in order to evaluate the flat solar collector. This provision of solar energy implies a low cost, associated with the incorporation of clean technologies with environmental responsibility, which make viable the use of renewable energies.

For the realization of the present work, two solar driers of indirect type were evaluated, composed of the flat solar collector and the drying chamber interconnected in a fixed installation; the dimensions of a rectangular box of 0.79 m x 2.57 m with 16 cm of internal height, for the ascending flow of air, constitutes a first solar collector of 1,92 m<sup>2</sup> of surface, named as CS1 and the second with increase of lateral area, on both sides of the collector CS1, which adds an area of 3,84 m<sup>2</sup> called solar collector CS2; while, the dimensions of the drying chamber is 0,797 m x 0,665 m in section and 0,94 m in height at the front and 1,07 m at the rear, with the capacity to carry up to four trays type mesh, of 0,348 m<sup>2</sup> of loading area of wet solids per tray.

Regarding the yield of dry potato production, determined in the global production process, referring to the two potato varieties evaluated, they were 21,9 % for the Canchán variety and 23,4 % for the Yungay variety.

Finally, the performance of the usable energy transformation, of the solar radiation incident on the collector of the solar dryer, which generates the heating of the air, is of an average of 62,5 %, which responds to the evaluation of the solar collector operating in a normal day.

**Key words:** indirect solar dryer, dry potato, dried.

## INTRODUCCIÓN

El secado, es una operación aplicada en todos los procesos industriales, que tiene como finalidad remover el contenido de humedad de un sólido húmedo, para reducir el volumen y preservar los productos alimenticios por largo tiempo, acorde a las normativas del contenido de humedad final, recomendados para el producto.

El presente trabajo de investigación, tiene por objeto evaluar el secador solar tipo indirecto, en correspondencia a los factores de variación del área del colector solar, al tipo de convección de aire que fluye en el secador y por el uso de variedades más abundantes de materia prima, para producir la *papa seca*; en cuyo propósito se aprovecha la enorme disponibilidad de la energía solar, que irradia toda la sierra del país, la región y particularmente la ciudad de Ayacucho, de manera permanente en la mayor parte del año. Ésta circunstancia aporta en la alternativa de industrializar y comercializar la papa, que le asigna un mayor valor agregado, aunándose también un proceso tecnificado en reemplazo de la producción artesanal de la *papa seca*, de este modo se permita regular la sobreproducción de papa en la región, evitando las pérdidas por deterioro de papa fresca, en diversas comunidades alto andinas, asociándose aún las dificultades de transporte y almacenamiento por periodos prolongados.

En la región, además de la papa, existe un conjunto de productos agroindustriales que requieren deshidratación, dentro de los procesos de post cosecha; para la ejecución del referido procedimiento de secado, de estos productos agrícolas, existen diversas tecnologías convencionales y no convencionales, como es el uso de la energía solar, en el modo de secado solar indirecto, que representa una de las alternativas más importantes. Destacando que, la energía solar es un recurso natural, primario, limpio y renovable, cuya utilización reduce considerablemente los costos operativos con respecto a otras formas de energías convencionales requeridas para el proceso de secado en general.

En el presente trabajo desarrollado, se ejecutó la evaluación de un secador solar indirecto, conformado por un colector solar plano y una cámara de secado, donde los sólidos húmedos a secar, no están dispuestos por su ubicación, a una exposición directa al sol. La evaluación planificada, se aplica al secado de papa, de las variedades Canchán y Yungay, que reportan un alto índice de producción en la región, tal que en la actividad de la producción de *papa seca*, se permita aprovechar las calidades 3ra y 4ta categoría de papa, para maximizar el uso y mejorar el precio de estas categorías; la utilización de las variedades Canchán y Yungay de papa es

determinado, debido a su gran similitud estructural de las papas cocidas y niveles de humedad inicial, y no se percibe una diferencia significativa de la variedad, en la operación de secado.

El secador solar permite el aprovechamiento energético de la radiación solar y la consiguiente conversión en energía térmica a un bajo costo, para calentar el aire ambiental que se utiliza para el secado del sólido húmedo; el secador solar indirecto es aquel equipo que presenta una cámara de secado, donde se dispone el material húmedo, sin que éstos se expongan a la radiación solar directa, ni a los factores ambientales externos, que provocaría la degradación de algunos componentes naturales (colorantes, principios activos, proteínas, etc.), así como también previenen las distintas contaminaciones externas que contrariamente ocurre en el secado a campo abierto.

En la evaluación del secador solar indirecto, se ha considerado la influencia del área del colector solar plano, determinándose mayor ventaja cuando se duplica el área del colector, que provee mayor disponibilidad de aire caliente, y manifiesta en el incremento de la velocidad de secado; también se ha considerado el tipo de convección natural y forzada del aire a través del colector y la cámara de secado, para la convección forzada se ha instalado un ventilador doméstico de 60 W de potencia, que aumenta el movimiento del aire caliente a través del lecho de papa húmeda, mejorando los coeficientes de transferencia de calor y de transferencia de masa, que reflejan en el mayor incremento de la velocidad de secado.

El tiempo neto de secado, de una carga de 4,0 kg de papas cocidas y trozadas, que tienen un tamaño comercial de 1cm x 1cm x 5cm, de tiras de papa húmeda de forma de un paralelepípedo, dispuestos sobre las cuatro bandejas del secador solar indirecto, toma de entre 6 a 8 horas, para un día normal con radiación solar permanente, alcanzando velocidades de secado comprendidos entre unos 0,4 a 0,6  $\text{kg}_{\text{agua}}/\text{m}^2.\text{h}$  que se eliminan en el periodo antecrítico, de acuerdo a las condiciones de operación del secador solar indirecto, reduciéndose considerablemente en el periodo postcrítico.

El producto final, descargado del secador solar, es la *papa seca* o deshidratada, que alcanza una humedad final media del 8,5 % para la variedad Canchán y del 9,1 % para la variedad Yungay, que presenta una apariencia algo translúcida, limpia y libre de la contaminación externa, lista para su empaque y almacenamiento, exenta de las contaminaciones externas que ocurren en un secado a campo abierto.



# CAPÍTULO I

## 1 GENERALIDADES

La evaluación de secadores solares de tipo indirecto en el rendimiento de la producción de papa seca responde a la identificación de una problemática particular de la producción de papa y las condiciones energéticas en la región, que permiten establecer los objetivos e hipótesis del presente trabajo, expuestos sistemáticamente en éste capítulo.

### 1.1 PROBLEMA

Ayacucho se ubica entre las principales regiones de producción de papa, que aporta al mercado local, regional y nacional, con presencia periódica del fenómeno de sobreproducción, que conlleva al deterioro y pérdidas económicas para los agricultores; además, la comercialización de la papa en la condición de materia prima, tampoco es rentable. Éste panorama conduce a la alternativa de producir *papa seca*, para asignar un valor agregado, en las categorías más bajas de la papa; sin embargo, para ello utilizan una tecnología artesanal, donde el secado demanda de mayor tiempo, además se extiende la papa a secar, directamente a los rayos solares en la intemperie, el manipuleo es artesanal, en general, es un proceso en condiciones subestandar.

Las ventajas del que goza la región, después de la abundancia de la materia prima, son los altos niveles de radiación solar en gran parte del año, que es

una energía renovable y limpia no muy utilizada en los procesos productivos, es una fuente de energía convertible en calor necesario, para el secado por medio de un proceso tecnificado. Esta condición permite plantear el trabajo de investigación, con el uso de un secador solar indirecto, que garantiza el manejo y calidad del producto final.

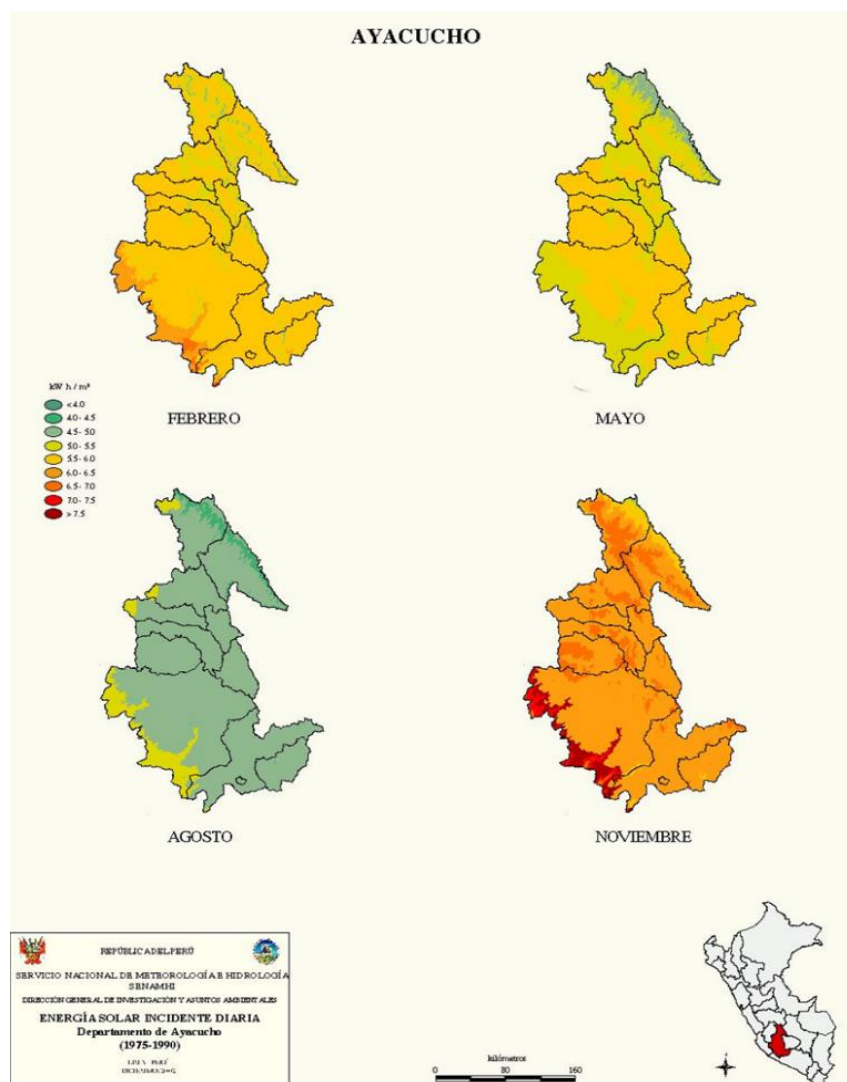
### **1.1.1 Descripción contextual**

La región de Ayacucho tiene una topografía accidentada por el cruce de las cordilleras y una diversidad de pisos ecológicos, con días soleados en la mayor parte del año, ocupando una extensión territorial de 43 815 km<sup>2</sup> (4,38 millones de hectáreas), principalmente en las zonas rurales; de las cuales se registra 231 623,26 hectáreas de superficie agrícola, siendo mayormente terrenos de secano (62,2 %) debido a la falta de agua para el riego en gran parte de la región (IV CENAGRO, 2013). Entre los cultivos transitorios de la región de Ayacucho, se tiene una producción de unos 304 mil toneladas de papa (6,7 % de la producción nacional), con un rendimiento promedio de 14,8 t/ha, identificándose las variedades de amarilla, peruanita, huayro, Huamantanga, Yungay y Canchán (MINAGRI, 2017), que constituyen un gran potencial de materia prima, cuyos excedentes de comercialización son destinados a la producción de chuño y papa seca.

En una importante área geográfica de la región Ayacucho, se perciben días soleados intensos y permanentes en gran parte del año, especialmente en las regiones alto andinas, relativamente disminuidas en el periodo de lluvias, tal como se puede apreciar en la Figura 1.1, en la cual se presentan los mapas de irradiancia solar para la región de Ayacucho, observándose niveles mayores a 5 kW.h/m<sup>2</sup> para meses como febrero, mayo y especialmente de noviembre, afirmándose de acuerdo al Atlas Solar del Perú una elevada radiación solar anual para la sierra que podría variar entre unos 5,5 a 6,5 kW.h/m<sup>2</sup>, con primeras y mayores aplicaciones en el tipo fototérmico y gran potencialidad hacia los tipos fotovoltaicos y generación de energía eléctrica (SENAMHI, 2003; Delta Volt SAC: <http://deltavolt.pe>)

Por otro lado, es una práctica importante en nuestra región, el desarrollo del secado de papa por exposición directa al sol, extendiéndose el material sobre plásticos, mantas, lonas o yutes en el suelo, exponiéndose el producto de manera prolongada al aire libre, siendo vulnerable a la interacción con insectos, aves y otros agentes de contaminación ambiental, como el mismo polvo, sujeto

a los riesgos de la inclemencia del tiempo; además, demanda mayor mano obra en su manipulación, eventos comunes y cotidianos en las que incurren muchos pequeños productores, que constituyen en el principal problema del secado solar que afectan la calidad, costo del producto final y oportunidades de inserción en mercados exigentes.



**Figura 1.1** Energía solar incidente en la región de Ayacucho

En el proceso artesanal se reporta la cocción de la papa, el pelado y el trozado en pequeñas tiras, para luego someter al secado del material por exposición directa al sol extendido sobre pisos llanos por unos 4 a 5 días de sol radiante y obtener la papa seca para su comercialización. La humedad de la papa cocida oscila en unos 80 %, alcanzando al final alrededor del 10 % de humedad en

base húmeda, reportándose un rendimiento promedio de aproximadamente 1 kg de papa deshidratada producida por cada 5 kg de papa fresca procesada, con un requerimiento de espacio de secado para exposición directa al sol de unos 4 m<sup>2</sup> por cada 100 kg de papa húmeda extendida.

### **1.1.2 Delimitación del problema**

El aspecto temático de la producción de *papa seca* así como el *secador solar de tipo indirecto* no tienen mayores delimitaciones, por ser conceptos y teorías universales de la operación unitaria de secado de materiales sólidos y la factibilidad de conversión de la energía solar radiante en energía térmica; sin embargo, la producción de papa analizada en la región nos permiten delimitar el trabajo de investigación a las variedades de Canchán y Yungay, por ser las variedades comerciales más representativas; por otra parte, los niveles de radiación solar incidente en la región también varían de acuerdo a la localidad y la estación del año, considerando como una delimitación espacial para el estudio a las condiciones climatológicas de la ciudad de Ayacucho, considerado como una microlocalización para la evaluación del secador solar indirecto aplicado al secado de papa.

Los niveles de radiación solar en la ciudad de Ayacucho son relativamente mayores en el periodo de mayo a diciembre, estableciéndose para el estudio una programación temporal comprendido entre junio a noviembre del año 2017, con aprovechamiento de la energía radiante del sol entre las 9 am a las 4 pm.

### **1.1.3 Formulación del problema**

No obstante, los importantes niveles de producción de papa en Ayacucho, así como la ventaja de la radiación solar permanente en gran parte del año, como fuente de energía radiante, convertida en energía térmica, necesaria en el funcionamiento de los secadores, existen diversos inconvenientes para aprovechar estos recursos potenciales, entre ellos, el procedimiento de producir la *papa seca* es artesanal, que genera mayor tiempo de secado, uso de grandes extensiones de área de secado, por otro lado, el fenómeno de la sobreproducción periódica conduce a pérdidas económicas y de producto, asimismo la falta de políticas de comercialización que favorezcan a los productores, incluso el deficiente transporte en las comunidades y centros de producción, en consecuencia, es necesario la alternativa de producción tecnificada de *papa seca*, para asignar un mayor valor agregado sobre la materia prima; por lo que, permite establecer la siguiente enunciado del problema.

### **Problema principal**

- ¿Será posible evaluar los secadores solares tipo indirecto en el rendimiento de la producción de papa seca, a partir de las variedades Canchán y Yungay en la localidad de Ayacucho?

### **Problemas secundarios**

- ¿Será viable determinar la eficiencia de transformación de la energía solar incidente sobre el colector de los secadores solares tipo indirecto en energía térmica útil para el calentamiento del aire en las condiciones de la localidad de Ayacucho?
- ¿Será factible determinar las características de la materia prima y evaluar el secador solar tipo indirecto aplicado en la operación de secado de papa para determinar las curvas características y la velocidad de secado?
- ¿Se podrá determinar la eficiencia del secador solar indirecto en el rendimiento de la producción de papa seca en función a la variedad de papa evaluada y las condiciones operativas del equipo?

## **1.2 OBJETIVOS**

### **Objetivo general**

- Evaluar los secadores solares tipo indirecto en el rendimiento de la producción de papa seca, a partir de las variedades Canchán y Yungay en la localidad de Ayacucho.

### **Objetivos específicos**

- Determinar la eficiencia de transformación de la energía solar incidente sobre el colector de los secadores solares tipo indirecto en energía térmica útil para el calentamiento del aire en las condiciones de la localidad de Ayacucho.
- Determinar las características de la materia prima y evaluar el secador solar tipo indirecto aplicado en la operación de secado de papa para determinar las curvas características y la velocidad de secado.
- Determinar la eficiencia del secador solar indirecto en el rendimiento de la producción de papa seca en función a la variedad de papa evaluada y las condiciones operativas del equipo.

### **1.3 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA**

Los considerables niveles de producción de papa que se registran en la región de Ayacucho, con tendencias a la sobreproducción en algunas temporadas y con ciertas dificultades de movilización desde los centros de producción, ya sean por los precarios sistemas viales para el transporte, los deficientes sistemas y canales de comercialización en la región e inclusive las adversidades climáticas como son las temporadas de intensas lluvias y huaycos, afectan la comercialización normal de la papa fresca; por lo tanto, se justifican los procesos alternativos de procesamiento y producción de papa deshidratada, que se potencializan con el uso de las energías renovables como es la energía solar, debido a los niveles favorables de radiación solar en diversos territorios de la región, como es el caso de la localidad de Ayacucho.

La importancia de la incorporación de las energía renovables y limpias, como es la energía solar, transformada como energía térmica en los secadores solares indirectos, permiten aprovechar el calor transferido al gas de secado para la obtención de la papa seca o deshidratada, condición que favorece la preservación prolongada de la papa y su potencial de comercialización programada, con beneficios económicos para los productores, sin que éstos sean perjudicados por la estacionalidad en la producción transitoria, los grandes volúmenes de producción, la reducción de los precios unitarios de venta en la época de producción de papa y otros factores que se traducen en pérdidas y grandes deterioros de materia prima.

Además, se considera como un aporte a la investigación e incorporación intensiva del uso de energías renovables y limpias así como las aplicaciones técnico productivas en el secado de papa, que aporta a las poblaciones productoras de papa de nuestra región, en el marco de la filosofía de las tecnologías apropiadas, de naturaleza versátil y práctica; complementado con el conocimiento científico y aporte a la comunidad académica, sobre los aspectos de ingeniería de la operación unitaria de secado dentro de los procesos de transformación de materia prima y generación de bienes con valor agregado.

## 1.4 HIPÓTESIS

### Hipótesis general sustantiva: H<sub>s</sub>

- Las adecuadas condiciones de operación de los secadores solares tipo indirecto evaluados favorecerían el rendimiento de la producción de papa seca, a partir de las variedades Canchán y Yungay en la localidad de Ayacucho.

### Hipótesis secundarias

- La eficiencia de transformación de la energía solar incidente sobre el colector de los secadores solares tipo indirecto sería significativo en energía térmica útil para el calentamiento del aire en las condiciones de la localidad de Ayacucho.
- Con la determinación de las características de la materia prima y la evaluación del secador solar tipo indirecto aplicado en la operación de secado de papa se obtendrían las curvas características y la velocidad de secado.
- La eficiencia del secador solar indirecto en el rendimiento de la producción de papa seca estaría en función a la variedad de papa evaluada y las condiciones operativas del equipo.

## 1.5 VARIABLES

Están vinculados con el enunciado de la investigación, en la cual se identifica el hecho de que cómo influye los **secadores solares de tipo indirecto** en el **rendimiento de la producción de papa seca**; por ende, se identifica como la **causa** del fenómeno a estudiarse o manipularse en la investigación de los secadores solares de tipo indirecto, incidiendo como **efecto** o consecuencia de la misma en el rendimiento de la producción de papa seca. A continuación, se sistematiza la identificación de variables e indicadores:

### 1) Independiente

**X = SECADORES SOLARES DE TIPO INDIRECTO**

**Indicadores:**

X1 = Características funcionales del secador solar indirecto

X2 = Carga y calentamiento de aire (temperatura de secado)

X3 = Capacidad de procesamiento y velocidad de secado

**2) Dependiente**

**Y = RENDIMIENTO DE LA PRODUCCIÓN DE PAPA SECA**

***Indicadores:***

Y1 = Características de la materia prima: papa

Y2 = Niveles de deshidratación

Y3 = Rendimiento

**3) Interviniente**

**Z = INCIDENCIA DE LA RADIACIÓN SOLAR**

***Indicadores:***

Z1 = Niveles de incidencia y exposición solar

Z2 = Eficiencia de transformación térmica



## CAPÍTULO II

### 2 FUNDAMENTO TEÓRICO

Se hace necesario realizar una revisión bibliográfica, concerniente a los antecedentes bibliográficos y fundamentos teóricos relacionados al uso y manejo de los secadores solares, especialmente los del tipo indirecto, para la elaboración y producción de diversos productos secos, como el caso de la papa seca, motivo del presente trabajo de investigación.

#### 2.1 ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS

Los años 60, 70 y parte de los 80, queda marcado como la época de oro de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, con presencia de personalidades, en el ámbito de la ciencia y tecnología. Entre los pioneros el Dr. **Maximiliano Durán** siendo docente de la UNSCH, y posterior físico nuclear en la Universidad La Sorbona París, impulsó los primeros trabajos sobre energía solar y energética, según como tiene registrado en la biblioteca de la UNSCH el trabajo titulado: “Biogás y su tecnología para la zona rural del Perú”; el año 1979 **Ambrosetti B. Paolo** trabajó en la investigación de la Energía Solar, en el marco del Programa de Investigaciones de las Energías Naturales de Ayacucho (P.I.E.N.A.), y publicó el trabajo titulado “La energía solar en la región de Ayacucho: evaluación y perspectiva”

Por otro lado, cabe destacar la reseña histórica del Dr. **Manfred Horn** (2015)

sobre la Asociación Peruana de Energía Solar - APES Perú Solar, remarcando que la crisis del petróleo de 1973 impulsó la investigación y desarrollo tecnológico de las energías renovables en el Perú, mencionando la creación del Instituto de Aplicaciones de la Energía Solar - INAES creada el año 1972 en la UNSCH que luego se transformará en el Instituto de Investigaciones de Aplicaciones de las Energías Naturales – INAEN, y otras organizaciones e instituciones que han aportado al desarrollo de las técnicas de aprovechamiento de las energías renovables en el Perú.

Estos antecedentes crecientes, sobre energía solar en la Universidad de San Cristóbal de Huamanga, permite un conjunto de trabajos de investigación y construcción de módulos con el uso de energía solar. Entre los más destacados, corresponden al “Estudio Técnico para utilización de la energía solar en destilación flash de alcohol etílico” **Mendoza (1981)**, se encuentra también, el trabajo referido al “Estudio y diseño de un colector Fototérmico plano para calentamiento de agua en Ayacucho”, **Castillo (1982)**, y dentro de esa misma década destaca, el “Estudio experimental para el diseño de un secador solar de café” **Aronés (1987)**,

Esta importante condición de auge, sufre un giro diametral para los años 90, entrando la UNSCH en un aletargamiento, en los trabajos de investigación respecto a la energía solar; por el contrario, irónicamente toda esa dinámica de avance sufre un traslado a la región de Arequipa, donde actualmente han desarrollado trabajos sobre aprovechamiento de la energía solar aplicados a nivel industrial para calentamiento de agua. Igualmente, en el ámbito nacional se han ido avanzando en diversos campos, tales como sistemas de cocción, calentadores de agua, pequeños calderos, entre otros.

Los trabajos siguientes son referencias que coadyuvan con el desarrollo de la investigación:

- a) **Rivasplata C. César et al. (2003)**, Diseño y evaluación de un secador solar para el secado industrial del tomate. Evalúan el secado de tomate en rodajas dispuesta en bandejas de un secador solar indirecto en un periodo de unas dos semanas, complementando a la energía solar con calentamiento eléctrico por las noches; reportan que la eficiencia del secado varía de acuerdo a las horas de insolación, la concurrencia de vientos y la carga de material húmedo.
- b) **Yenque J. y Cancino N. (2001)**, Tipos de Secadores Solares. Presentan

una revisión sobre los diferentes tipos de secadores como son el Gabinete tipo Brace o Lawand y el tipo Chimenea, exponiendo los materiales, aplicaciones, ventajas y desventajas de los mismos.

- c) **Vitor Morales, Omar (2014)**, Determinación del tiempo de secado de la quinua (*chenopodium quinoa*) usando un secador solar mixto e indirecto en Ayacucho. Determinan el tiempo de secado de la quinua lavada usando un secador solar mixto e indirecto. Los espesores de lecho de sólidos a secar estudiados fueron de 2; 4; 6 y 8 milímetros, el tiempo de duración del secado solar reportado es de unas 4 horas y los factores que influyen en el secado solar evaluados fueron la radiación solar y la velocidad de viento, afectando las temperaturas alcanzadas.
- d) **Sánchez A. Jorge A. (2009)**, Diseño y construcción de un secador solar para cochinilla de 300 kg/mes de capacidad de producción. Demuestra que este secador con el tamaño indicado puede producir 300 kg/mes de cochinilla seca bajo condiciones de radiación solar instantánea de 800 W/m<sup>2</sup>. Las dimensiones del colector solar para el secado de cochinilla son de 1,6 m de ancho, 4 m de largo, la altura de ingreso de aire es de 8 cm y la altura de salida del colector es de 17 cm.
- e) **Torres Maira. y Vega Daniela (2015)**. Evaluación de un sistema de secado con energía solar, para deshidratar los residuos orgánicos generados en el restaurante del bloque d de la Universidad Libre sede Bosque Popular. Se evalúa un sistema de secado con energía solar, para deshidratar los residuos orgánicos generados en el restaurante del Bloque D de la Universidad Libre sede Bosque Popular en Bogotá Colombia; teniendo en cuenta el porcentaje de eficiencia de los secadores, y con base en los resultados del ANOVA, y el análisis Tukey se concluye que no existe diferencias significativas entre los cuatro secadores, pues se obtuvo un producto seco con características de carbono, nitrógeno, proteína y fosforo aceptables, de acuerdo a la NTC 5167

## 2.2 ENERGÍA SOLAR

Dentro de la inmensa galaxia denominada la Vía Láctea se encuentra el sistema solar, cuyo centro es el sol orbitado por distintos planetas, entre ellas la tierra; el sol es la fuente de energía primaria y vital para la tierra.

### 2.2.1 El Sol

Las estrellas (como es el Sol) son motores de energía cósmica y los únicos que producen calor, luz, rayos ultravioletas, rayos X y otras formas de radiación. Están compuestas casi en su totalidad de gas y plasma, un estado de supercalentamiento de la materia compuesta de partículas subatómicas.

El Sol se formó hace 6 500 millones de años a partir de una enorme nube interestelar de gas frío y tiene combustible para más de 5 000 millones de años; contiene más del 99% de toda la materia del sistema solar, con un diámetro aproximado de 1,4 millones de km (109 veces más que la Tierra). La distancia de la Tierra al Sol es aproximadamente 150 millones de km, la radiación electromagnética emitida por el Sol que tiene una velocidad de 300 000 km/s en el vacío, tarda un poco más de 8 minutos en llegar a la Tierra (Blanco-Cano, 2009; Mendoza, 2011).

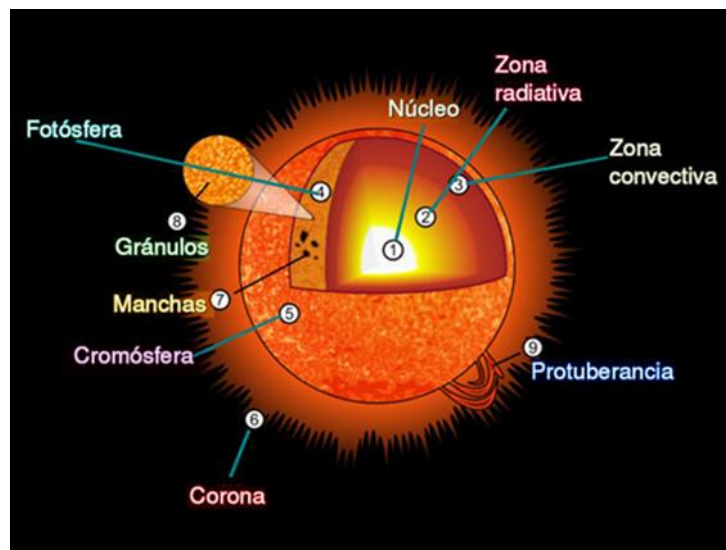


Figura 2.1 Estructura del Sol

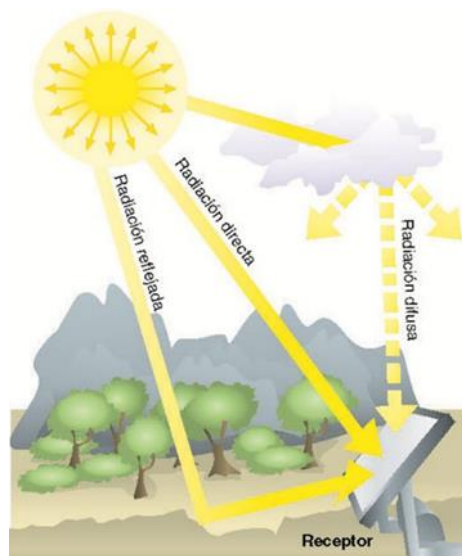
El núcleo es de alta densidad y representa al reactor nuclear del Sol, en la que millones de toneladas de hidrógeno se transforman en helio por cada segundo con una gran generación de energía liberada en forma de radiación, absorción y convección; se estima que cada segundo unos 4,4 millones de toneladas de materia son convertidos en  $4 \times 10^{26}$  Joules de energía. Debido a reacciones nucleares la composición química del núcleo cambia, por lo cual es diferente que el promedio del Sol; el hidrógeno representa solamente el 40 % de la masa total del núcleo, mientras que el helio es casi el 60 % (Blanco-Cano, 2009).

La Tierra en función a su distancia del Sol y su diámetro, recibe cada segundo,

una energía de equivalente a 180 000 TW ( $1,8 \times 10^{14}$  kW); esto representa aproximadamente las dos millonésimas partes de la energía total del Sol; la parte que nosotros vemos del Sol es la superficie solar – fotosfera que tiene una temperatura de alrededor de los 5 800 K y en el núcleo asciende a unos 15,7 millones K, el Sol posee una atmósfera que se extiende millones de kilómetros hacia el espacio, en realidad no tiene límites: es la famosa **corona solar**, tal como se percibe en la estructura solar expuesta en la Figura 2.1.

### 2.2.2 Radiación Solar

La radiación solar que llega al sistema tierra - atmósfera, se conoce también con el nombre de radiación de onda corta que van de  $0,15 \mu\text{m}$  a  $4 \mu\text{m}$  aproximadamente, incluyendo el espectro visible para el ojo humano, que es el flujo de energía radiante emitida, transferida o recibida del sol en forma de ondas electromagnéticas; del 100 % de radiación solar que llega al tope de la atmósfera sólo un 25 % llega de manera directa a la superficie de la Tierra, un 26 % es dispersado por la atmósfera como radiación difusa que también ingresa a la superficie terrestre (que suman unos 51 %), el 19 % es absorbido por las nubes y gases atmosféricos y el 30 % restante se pierde hacia el espacio; tal que, las pérdidas se dan en conjunto por la dispersión de la atmósfera hasta en unos 6 %, por el reflejo de las nubes unos 20 % y por reflejo desde el suelo el 4 % restante; mientras que, de los 51 % que arriban a la superficie terrestre, unos 40 % evaporan agua, unos 59,8 % se absorben en mares y océanos y sólo unos 0,2 % en los procesos de fotosíntesis de plantas (Mendoza, 2011; Arenas, 2011)



**Figura 2.2** Vías de recepción de la energía solar en una superficie colectora

La radiación solar que recibimos del Sol y que llega de manera efectiva a la superficie de la Tierra o sobre un determinado receptor es través de tres vías, tal como se esquematiza en la Figura 2.2, y estas son (Mendoza, 2011):

- **Radiación directa:** Es la radiación que incide sobre los objetivos iluminados por el sol sin haber interactuado con nada y sin cambiar de dirección (es la más importante en un día soleado).
- **Radiación difusa:** Es una radiación que incide indirectamente, como reflejo de la radiación solar que es absorbida por el polvo y el aire (es la radiación típica de los días nublados).
- **Radiación reflejada o albedo:** Es la radiación procedente de la reflexión de la radiación directa en los elementos del entorno, suelos y otras superficies próximas (es importante cerca del mar y de las zonas con nieve).

### 2.2.3 Irradiación e irradiancia

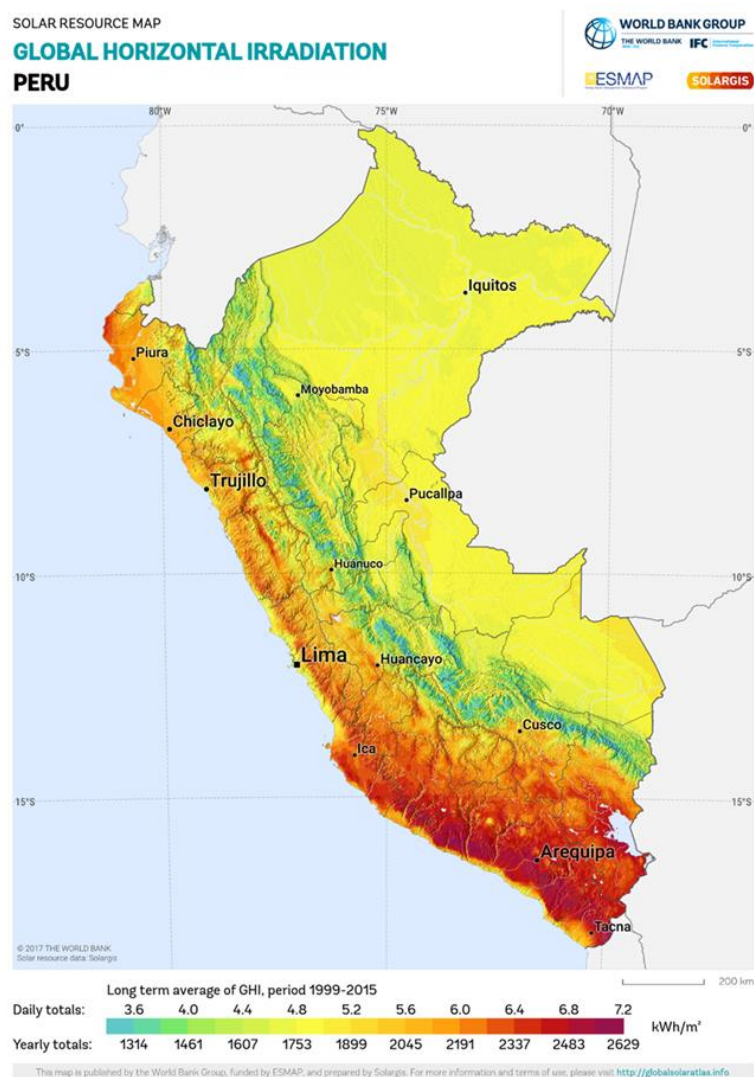
La irradiación se aplica al caso de un objeto expuesto a una fuente de radiación, luego la superficie terrestre recibe una irradiación emitida por el Sol; por lo tanto, la superficie terrestre es irradiada por el Sol; para cuantificar la radiación solar se utilizan dos magnitudes que corresponden a la potencia y la energía de la radiación que inciden sobre la unidad superficial, siendo los siguientes:

- **Irradiancia:** Es la **potencia** de la radiación incidente en una unidad de superficie horizontal, se mide en **W/m<sup>2</sup>**.
- **Irradiación:** Es la **energía** incidente en una superficie o la exposición radiante en el tiempo o insolación, obtenida como la integración o suma de las irradiancias incidentes sobre la superficie en un periodo de tiempo, se mide en **J/m<sup>2</sup>** que puede ser integrada por hora, día, semana, mes o año de evaluación, según el caso que corresponda.

Las cantidades o *niveles de radiación* se expresan en la **irradiancia** como la magnitud de potencia por radiación electromagnética que incide en una superficie unitaria horizontal, medidas de acuerdo a un sensor de radiación o piranómetro (orientado al sur y sin sombras); de tal manera que las Tablas y mapas registran la irradiancia recibida por la superficie terrestre, cuyas unidades en el sistema internacional de unidades es el **W/m<sup>2</sup>**, que representa el flujo de energía electromagnética (energía/tiempo: 1 J/s = 1W) que recibe cada un metro cuadrado (SENAMHI, 2003).

La radiación solar medida en cada una de las estaciones meteorológicas es ofrecida en unidades de  $W/m^2$ . En el caso de los datos 10 minutales se trata de la potencia media en 10 minutos y en el caso de la radiación diaria representa la potencia media del día. Si quiere convertir la radiación solar global de unidades de **potencia** a unidades de **energía**, para los datos de 10 minutales debe multiplicarse por 600 s (equivalentes a 10 minutos) y el resultado estará en  $J/m^2$  o  $W.s/m^2$ ; y en caso de utilizarse los datos de radiación solar global media diaria, debe multiplicarse la potencia por 86 400s (equivalentes a un día) y el resultado estará también en  $J/m^2$  o  $W.s/m^2$  o los múltiplos apropiados; para fines prácticos de conversión de energía se acostumbra expresar las unidades de irradiación en  $kW.h/m^2$  u otros múltiplos, mayormente integrados por día y por año (Navarra, 2018; Calculation Solar Blog, 2013; Mendoza, 2011)

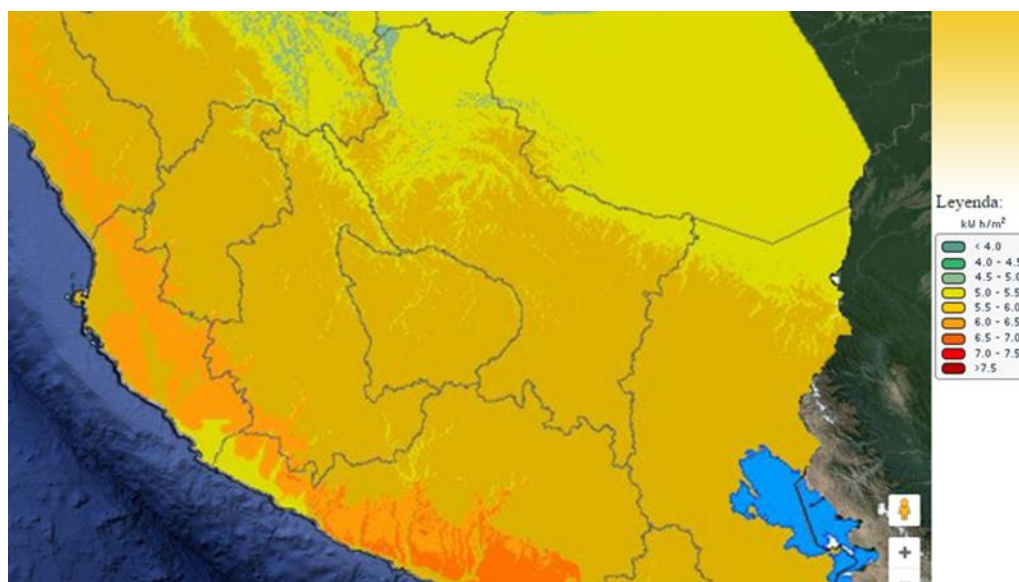
## 2.2.4 Mapas solares



**Figura 2.3** Mapa solar de irradiancia global horizontal para el Perú, 1999 – 2015 (SOLARGIS, 2017)

Son mediciones de niveles de irradiación media expresadas sobre mapas territoriales. Por ejemplo, SOLARGIS (<https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/>), publica mapas solares para diversos países del mundo en paralelo con **Global Solar Atlas** del World Bank Group fundado por ESMAP, reportándose para el caso del Perú el mapa solar promedio para el periodo 1999 – 2015, tal como se ve en la Figura 2.3, expresados en irradiancia global horizontal por día total (entre 3,6 a 7,2 kW.h/m<sup>2</sup>) y a su vez en año total (entre 1 314 a 2 629 kW.h/m<sup>2</sup>).

Por otra parte, en el ámbito nacional, la Dirección General de Electrificación Rural del Ministerio de Energía y Minas del Perú (DGER-MEM) conjuntamente con SENAMHI publican la información actualizada sobre los **Mapas del Atlas Solar y Eólico** del país, que permiten promover y fortalecer el uso de las energías renovables; percibiéndose el grado de irradiación solar regional y nacional de forma mensual y anual promedio, tal como se aprecia en la Figura 2.4 para la región de Ayacucho. En términos generales se percibe un gran índice de irradiación solar en gran parte del año calendario, en el orden de unos 5 a 6 kW.h/m<sup>2</sup>.



**Figura 2.4** Mapa de irradiación solar promedio recibida por la región de Ayacucho, en kW.h/m<sup>2</sup> (SENAMHI, 2003)

A través de diversos trabajos de investigación y publicaciones se informa que el nivel de **irradiación diaria** media anual registrado en la estación de Palcachacra de Ayacucho es de 6,84 kW.h/m<sup>2</sup>, en la estación de Cechapampa se tiene 6,62 kW.h/m<sup>2</sup>, mientras que en la localidad de Ayacucho se tiene entre

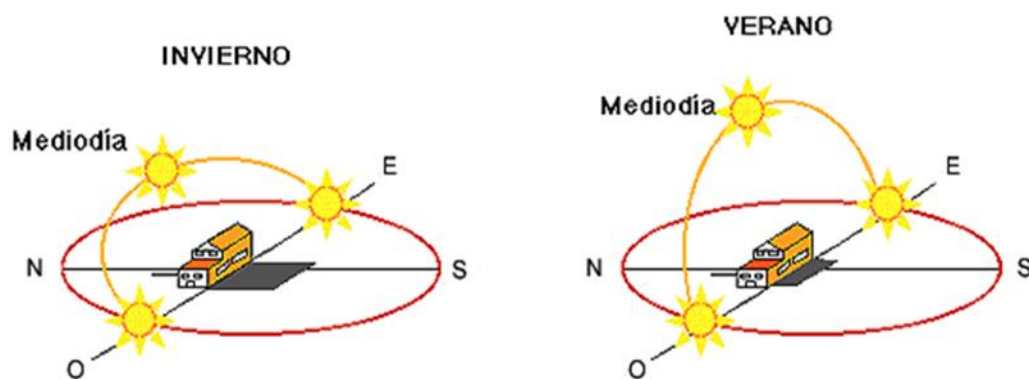


4,89 kW.h/m<sup>2</sup> a 5,17 kW.h/m<sup>2</sup>; evidenciando la gran potencialidad de uso de la energía solar para diversas aplicaciones que pueden ser **térmicas** para la generación de energía calorífica utilizable para calentadores, hervidores, generadores de vapor, secadores y demás usos así como los **fotovoltaicos** para la generación de energía eléctrica.

### 2.2.5 Variaciones de la radiación sobre la tierra

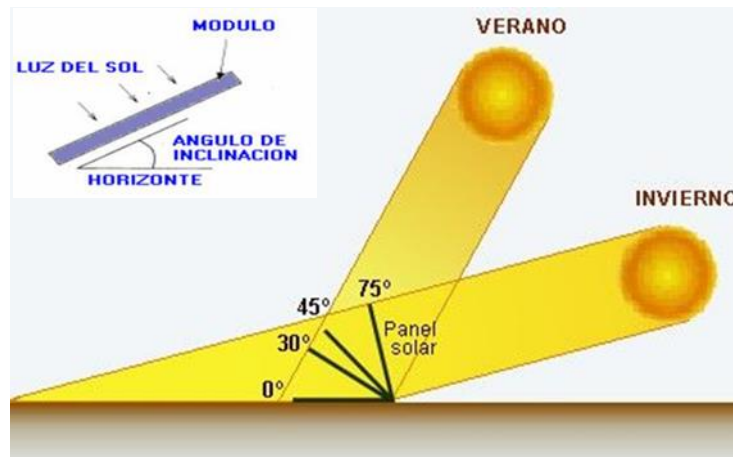
Los niveles de radiación sobre un plano de la superficie terrestre varían considerablemente en función a diversos factores, muy a pesar de contar inclusive con un día totalmente soleado, tales como son (Mendoza, 2011):

- Movimiento traslacional de la tierra (perihelio y afelio)
- Las estaciones del año e incidencia solar (solsticios y equinoccios)
- Movimiento rotacional de la tierra y las horas del día
- Declinación solar de acuerdo al plano eclíptico
- Las coordenadas geográficas del territorio en particular (latitud y longitud)
- Condiciones atmosféricas (nubes, humedad, gases, polvos, etc.)
- Posicionamiento del sol con respecto a la superficie colectora
- Ángulo de incidencia solar sobre el colector
- Tiempo solar (verdadero y medio)
- Coordenadas horarias



**Figura 2.5** Trayectoria e incidencia del rayo solar de acuerdo a las estaciones y la hora (Mendoza, 2011)

En la Figura 2.5 se puede apreciar cómo varía el nivel de irradiación solar en función a la variación de las estaciones del año, como es el caso máximo del verano y el mínimo en invierno; así como la variación de acuerdo al transcurso de las horas del día, adquiriendo mayor nivel de irradiancia hacia el mediodía.



**Figura 2.6** Inclinación del colector y paneles solares de acuerdo al ángulo de incidencia solar

Dado que el ángulo de incidencia solar ha de variar con el transcurso de los días dentro de las estaciones del año, exigen que la inclinación del colector y los paneles solares deben variar armónicamente, como se esquematiza en la Figura 2.6, a fin de mejorar la incidencia de irradiación solar sobre la superficie del módulo colector o del panel solar.

## 2.2.6 Radiación solar en el Perú

La radiación solar es variable de un lugar a otro, también las hay de una estación a otra. A continuación, se presenta la Tabla 2.1 de la radiación diaria media mensual.

**Tabla 2.1** Estimación de la radiación solar diaria en la media mensual por regiones del Perú. (Orbegozo, 2010)

DEPARTAMENTO	PROVINCIA	DISTRITO	LAT. Grad	ALT. m	IRRADIACIÓN DIARIA MEDIA MENSUAL EN KWh/m2												MEDIA ANUAL KWh/m2
					E N E	F E B	M A R	A B R	M A Y	J U N	J U L	A G O	S E T	O C T	N O V	D I C	
Junín	Huánuco	Huachac	12.0	1150	5.0	4.9	4.7	4.7	4.6	4.4	4.5	4.8	4.9	5.3	5.4	5.2	4.9
Huancavelica	Castrovirreyna	Aconococha	13.1	4520	4.9	3.7	4.1	4.3	4.2	4.6	4.3	4.6	4.9	4.9	5.2	4.9	4.8
<b>Ayacucho</b>	<b>Huamanga</b>	<b>Ayacucho</b>	<b>13.2</b>	<b>2760</b>	<b>5.1</b>	<b>5.1</b>	<b>4.7</b>	<b>4.7</b>	<b>4.5</b>	<b>4.2</b>	<b>4.2</b>	<b>4.7</b>	<b>5.0</b>	<b>5.4</b>	<b>5.7</b>	<b>5.3</b>	<b>4.9</b>
Apurímac	Abancay	Abancay	13.6	2378	4.8	4.7	4.7	4.6	4.4	4.2	4.2	4.7	5.0	5.5	5.4	5.0	4.7

Es una adaptación de la fuente original. Vasques, J.W. & Lloyd, P. Estimación de la energía solar en el Perú en Revista Energética. OLADE, AÑO 11 N° 1, abril de 1987

Los colectores solares están inclinados para captar mayor radiación solar. La cantidad óptima de energía se capta cuando el colector está inclinado en el mismo ángulo que el de la latitud, entonces la radiación promedio recibida

deberá ser corregida utilizando un factor de inclinación, según sugiere la siguiente Tabla 2.2.

**Tabla 2.2** Factores de inclinación determinados para el Perú. (Orbegozo, 2010)

Latitud	Factores de inclinación					
	15 °	20 °	25 °	30 °	35 °	40 °
0 – 5°	0.99	0.97	0.94	0.92	0.88	0.84
5 – 10°	1.01	1.00	0.98	0.96	0.93	0.89
* 10 – 15°	1.03	1.02	1.02	1.00	0.98	0.96
15 – 20°	1.06	1.07	1.06	1.05	1.04	1.02

\* La latitud de Ayacucho es de: 13° 09' 31", por tanto los factores de corrección, para cada colector con diferentes grados de inclinación encontramos en la fila roja

### 2.2.7 Energía solar fototérmica

El recurso energético de la radiación solar se puede aprovechar en dos grandes formas:

- Energía solar **fotovoltaica**
- Energía solar **fototérmica** o solar térmica

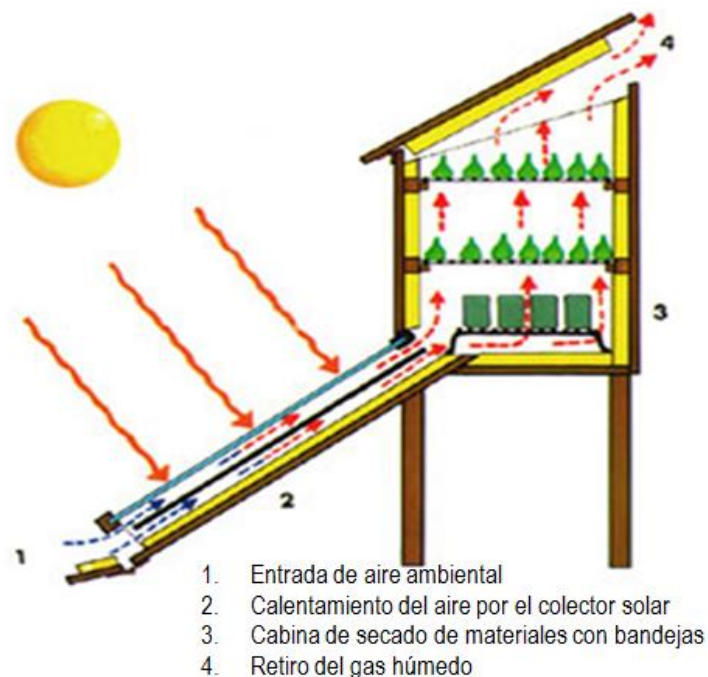
El aprovechamiento como energía solar fotovoltaica consiste en la captación de la energía solar sobre celdas semiconductoras y su conversión en energía eléctrica, bajo el llamado efecto fotovoltaico. En el Perú también se viene impulsando las instalaciones de centrales fotovoltaicas, como es el caso de la Central Solar **Tacna Solar** en Tacna de 20 MW de potencia instalada, **Majes** en Arequipa de 20 MW, **Repartición** en Arequipa de 20 MW, **Panamericana** en Moquegua de 20 MW, Central Solar de **Moquegua** de 16 MW, **Rubí** en Moquegua de 144 MW e **Intipampa** en Moquegua de 40 MW, que en conjunto representan ya algo del 2 % de la producción total eléctrica del SEIN en el Perú; éstas centrales solares aprovechan la gran radiación solar que reciben la costa meridional de Arequipa, Moquegua y Tacna que alcanzan valores de radiación media diaria anual de alrededor de los 250 W/m<sup>2</sup> (OSINERGMIN, 2018).

Por otra parte, la **energía solar fototérmica** consiste en la transformación de la energía solar en energía térmica o calor, a través de dispositivos de concentración de la luz solar que permiten alcanzar temperaturas elevadas que superan los 400 °C, utilizados para la generación de vapor y activación de turbinas de generación eléctrica, que serían las aplicaciones más intensivas de

la energía solar fototérmica; en el caso de centrales de generación termoeléctrica con fuente de energía solar se requieren disponer del concentrador, receptor, transportador de calor y conversión de energía, a través de tecnologías como el CCP (Concentrador Cilindro Parabólico), receptor central o los de disco parabólico (Mendoza, 2011)

Existe una amplia relación de aplicaciones de la energía solar térmica, desde niveles domésticos, comerciales e incluso industriales, entre las que se pueden mencionar:

- Calentamiento de agua (thermas, duchas, piscinas, etc.)
- Generadores de vapor de agua (calderos)
- Estufas solares
- Hornos solares
- Destiladores solares
- Cocinas solares
- Secadores solares (industriales, agrícolas, etc.)
- Deshidratación de biomateriales y alimentos
- Desalinización y purificación de aguas con energía solar
- Refrigeración por medio de energía solar
- Invernaderos solares
- Generadores de electricidad (cargadores, vehículos, etc.)
- Electrificación e iluminación



**Figura 2.7** Componentes de un secador solar indirecto con aprovechamiento de energía fototérmica.

De acuerdo al diagnóstico del uso de la energía solar y eólica en el país desarrollado por el MINEM, en el Perú se estima una instalación de más de 10 mil termas solares instaladas principalmente entre Arequipa (7 831), Ayacucho (44), Lima (21), Puno, Tacna y Ancash, mayormente instalado para hoteles y restaurantes; igualmente habrían más de 640 cocinas solares instalados mayormente entre Ancash (242) y Puno (128); y más de 760 secadores solares instalados principalmente entre Cusco (93), Cajamarca (88), Amazonas (88), Huánuco (90), Junín (134), San Martín (175) y Pasco (43), tal es el caso del secador solar tipo invernadero para la producción de orégano en Tacna. (García, 2005).

## 2.3 LA PAPA

La papa o patata (*Solanum tuberosum*), denominado como tubérculo sagrado, milenario y oriundo del Perú, cultivado inicialmente en la zona del altiplano (alrededor del lago Titicaca), hace aproximadamente 8 000 años, pero actualmente se cultiva en diversas regiones del planeta; es uno de los cultivos más importantes en el mundo, que se ubica en el tercer lugar, por ser el alimento que aporta principalmente los carbohidratos en la dieta de millones de personas en el mundo (Chávez, 2008).

### 2.3.1 Taxonomía de la papa

Es una especie de planta herbácea perteneciente al género *Solanum* de la familia de las *solanáceas*, cuya botánica sistemática presenta la siguiente taxonomía:

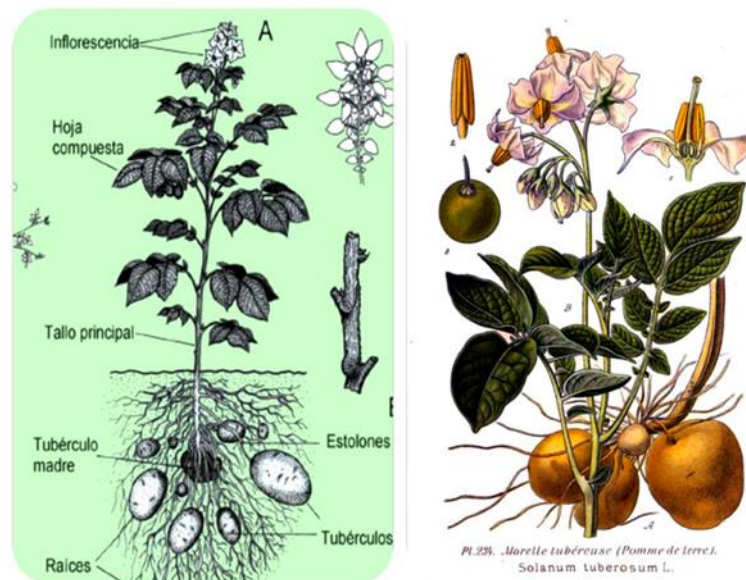
Reino	: Plantae
División	: Magnoliophyta
Clase	: Magnoliopsida
Subclase	: Asteridae
Orden	: Solanales
Familia	: Solanaceae
Subfamilia	: Solanoideae
Tribu	: Solaneae
Género	: Solanum
Subgénero	: Potatoe
Sección	: Petota
Especie	: <i>Solanum tuberosum</i>
Nombres comunes	: Papa, papa blanca; acshu (quechua); acso, akso, apalu, apharu, cchoke (aymara); catzari, mojaqui,

mosaki, tseri (asháninka); curao, kara, kesia (uru); moy papa, patata, pua, quinqui (aguaruna).

Las especies de papas más cultivadas son la *Solanum tuberosum*; sin embargo, existen unas nueve especies diferentes de papas: *S. goniocalyx*, *S. phureja*, *S. stenotomun*, *S. tuberosum*, *S. ajanhuiri*, *S. chaucha*, *S. juzepczukii*, *S. curtilobum*, y el *S. Tuberosumssp. andigenum*.

### 2.3.2 Descripción general

La papa es una planta herbácea y tuberosa, con hábito de crecimiento que varía de acuerdo a las especies, con marcadas diferencias morfológicas afectadas de acuerdo a la temperatura, humedad, fertilidad del suelo y las condiciones ambientales; se desarrollan a partir de una semilla o de un tubérculo. La planta conforme se va desarrollando extiende su raíz en el suelo formando los tubérculos o papas, denominados como tallos modificados y que constituyen los principales órganos de almacenamiento de la planta; mientras que en el tallo principal y laterales de la planta se va acrecentando el follaje con hojas compuestas, también se puede apreciar la inflorescencia con múltiples flores, tal como se describe en la Figura 2.8 (Inostroza, 1984)



**Figura 2.8** Morfología de una planta de papa.

### 2.3.3 Propiedades de la papa

Si bien la papa es un alimento muy bueno, hay muchas personas que afirman

que la papa engorda y por eso la eliminan erróneamente de su consumo diario; cabe aclarar que la papa, si no es mezclada con otra harina, no engorda, ya que, por cada 100 gramos de papa, tenemos tan solo unas 70 calorías. La composición química de la papa varía de acuerdo a las características genéticas, las variedades, la madurez, condiciones ambientales, tipos de suelos, fertilización y otros factores; en la siguiente Tabla 2.3 se presenta una composición típica del tubérculo de papa, siendo el componente básico de la materia seca el almidón.

**Tabla 2.3** Composición química del tubérculo de papa (Arun, 2006)

Componentes	Contenido porcentual	
	Promedio	Rango
Materia seca	23,7	13,1 – 36,8
Almidón	17,5	8,0 – 29,4
Azúcares reductores	0,3	0,0 – 5,0
Azúcares totales	0,5	0,05 – 8,0
Fibra bruta	0,71	0,17 - 3,48
Sustancias pécticas	-.-	0,2 – 1,5
Nitrógeno total	0,32	0,11 – 0,74
Proteína bruta	2,0	0,69 – 4,63
Nitrógeno de amidas	-.-	0,029 – 0,052
Nitrógeno de aminoácidos	-.-	0,065 – 0,098
Nitratos	-.-	0,0 – 0,05
Lípidos	0,12	0,02 – 0,20
Cenizas	1,1	0,44 – 1,87
Ácidos orgánicos	0,6	0,4 – 1,0
Ácido ascórbico (mg/100g)	10 – 25	1 – 54
Glicoalcaloides (mg/100 g)	3 – 10	0,2 – 41
Compuestos fenólicos	-.-	5 – 30

**Fuente:** Potato Science and Technology – 1986: Arun (2006)

Las papas frescas altamente nutritivas contienen por cada 100 g unos 78 g de humedad y 18,5 g de almidón, son ricas en potasio (560 mg) y vitamina C (20 mg); además la ONU destaca que *“la papa es un alimento de primera necesidad en la dieta de la población mundial, y el papel que ella puede cumplir para proporcionar seguridad alimentaria y erradicar la pobreza”* (Chávez, 2008).

En la Tabla 2.4 se presenta la composición típica para la papa fresca expresada por cada 100 g de porción comestible, contiene algunos minerales de importancia como son: el hierro y el magnesio, así como vitaminas esenciales como la vitamina C y B, cuyos valores pueden variar de acuerdo a

la variedad genética de la papa y los factores referidos y concordantes a lo expresado para la Tabla anterior.

**Tabla 2.4** Composición básica típica de papa fresca por cada 100 g de porción comestible (Arun, 2006)

Componentes	Proporción
Humedad (agua)	79,8 %
Energía (calorías)	76 cal
Proteínas	2,1 g
Grasas	0,1 g
Carbohidratos	17,1 g
Calcio	7 mg
Hierro	0,6 mg
Tiaminas	0,10 mg
Riboflavinas	0,04 mg
Niacinas	1,5 mg
Ácido ascórbico	20 mg

**Fuente:** Potato Science and Technology – 1986: Arun (2006)

#### 2.3.4 Variedades de la papa en el Perú

En el Perú existen más de 4 000 tipos de papa; se siembran alrededor de 3 200 variedades de papa; las nativas se caracterizan por su buen sabor y textura, con alto contenido de materia seca y buena capacidad de almacenamiento; sin embargo, tienen bajo rendimiento y son susceptibles a factores bióticos y ciertas enfermedades; igualmente se encuentran las variedades nativas mejoradas y comerciales. La biodiversidad puede ser protegida de diversas maneras, el Centro Internacional de la Papa (CIP) localizado en Lima, mantiene la más grande colección de papa del mundo, que incluye alrededor de 5 000 variedades de casi 100 especies silvestres de papa. La colección se mantiene en custodia bajo los auspicios de las Naciones Unidas (Chávez, 2008).




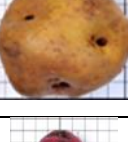


De los volúmenes comercializados de papa en el Gran Mercado Mayorista de Lima para el año 2016 se reporta que cerca del 81 % corresponden a la **textura blanca**, que comprende en su mayor parte a las variedades Canchán y Yungay, seguida en menor escala por otras variedades como Perricholi, Única, Andina y Serranita; en segundo lugar con un 12 % se ubican las papas de **textura de color**, que comprenden principalmente a las variedades de Huayro, Huamantanga y camotillo; mientras que en tercer lugar con un 7 % se colocan las papas de **textura amarilla**, como son las variedades Peruanita y Tumbay;



por lo general las variedades de textura blanca son de menor precio, y las de textura amarilla son las más caras por ser nativas (MINAGRI, 2017).

De acuerdo a la NTP 011.119 referida a papa y derivados se expresan los calibres para las principales variedades comercializadas en el Perú, las que se presentan en la Tabla 2.5 (NTP, 2010)

**Tabla 2.5** Variedades y calibres de papa de acuerdo al tamaño para su comercialización.

Variedad	Característica	Calibres			Figura de la papa
		Extra	Primera	Segunda	
Canchán	D* mayor (mm)	134 – 102	101 – 75	74 – 49	
	D menor (mm)	107 – 72	71 – 51	50 – 38	
	Peso (g)	639 – 320	319 – 155	154 – 29	
Perricholi	D mayor (mm)	127 -101	100 – 76	75 – 55	
	D menor (mm)	108 – 80	79 – 55	54 – 44	
	Peso (g)	615 – 382	381 – 179	178 – 50	
Yungay	D mayor (mm)	151 – 104	103 – 73	72 – 45	
	D menor (mm)	101 – 61	60 – 45	44 – 32	
	Peso (g)	710 – 321	320 – 132	131 – 20	
Amarilla Tumbay	D mayor (mm)	94 – 77	76 – 58	57 – 30	
	D menor (mm)	83 – 64	63 – 47	46 – 32	
	Peso (g)	361 – 202	201 – 99	98 – 20	
Huayro	D mayor (mm)	167 – 132	131 -90	89 – 43	
	D menor (mm)	66 – 53	52 – 45	44 – 35	
	Peso (g)	432 – 253	252 -118	117 – 20	
Peruanita	D mayor (mm)	130 – 88	87 – 60	59 – 50	
	D menor (mm)	98 – 63	62 – 45	44 – 40	
	Peso (g)	509 – 265	264 – 56	55 – 45	

(\*) Los diámetros mayor y menor están referidos a las dimensiones máximas y mínimas de los ejes longitudinal y transversal del tubérculo cuando se intersectan en ángulo recto.

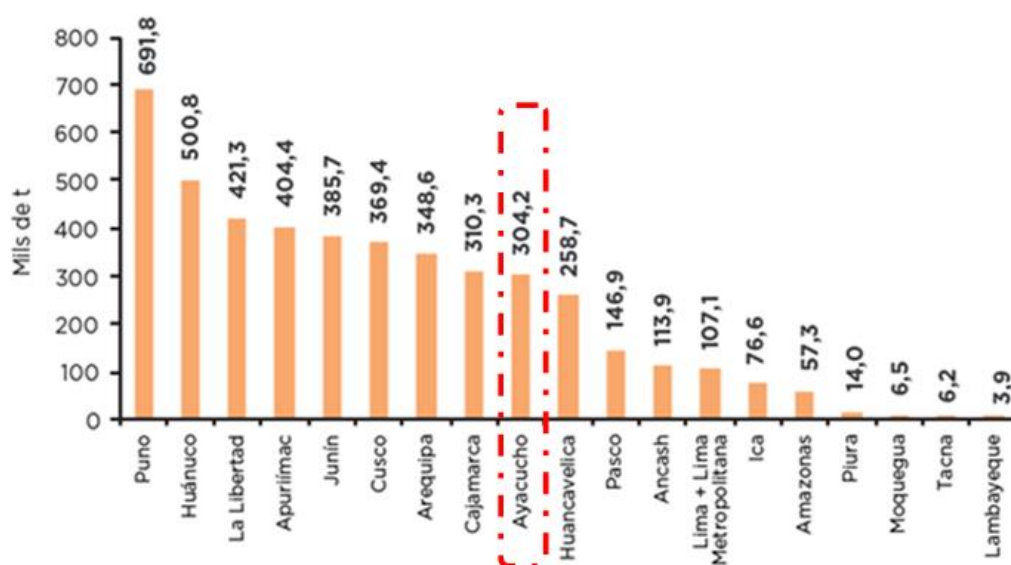
**Fuente:** Papa y derivados. Papa, Definiciones y Requisitos: NTP (2010)

En los mercados mayoristas Nery García Zarate y Las Américas de la región de Ayacucho se comercializan las variedades de papa Amarilla, Peruanita,

Huayro, Huamantanga, Yungay y Canchán; también se encuentran ciertas variedades exóticas de color, como la negra, morada y otros. Las principales zonas productoras de la región son las provincias de Huamanga, Cangallo y La Mar, cuyas cosechas se dirigen principalmente a Lima, Ica y a la selva del VRAEM, el resto de la producción se utiliza para el consumo local (MINAGRI, 2017).

### 2.3.5 Producción de la papa en el Perú y en Ayacucho

La producción de papa a nivel mundial, según estadísticas de la FAO, llegó a 381,7 millones de toneladas en el 2014, con una alta concentración en la China continental (que aportó la cuarta parte), seguidos por la India, la Federación Rusa, Ucrania y Estados Unidos, quienes conjuntamente aportaron más de la mitad del total de producción mundial. La producción de papa en el Perú para el referido año 2014 alcanzó los 4,7 millones de toneladas (1,2 % de la producción mundial) ocupando el lugar 14, dentro del conjunto de 150 países que siembran este cultivo; siendo el segundo país con mayor producción en América, después de Estados Unidos, y el primero en América del Sur (MINAGRI, 2017).



**Figura 2.9** Producción de papa por regiones en el Perú y en Ayacucho para el año 2016 (MINAGRI, 2017).

El Valor Bruto de la Producción (VBP) de Papa en el 2016, llegó a representar el 10,6 % del Valor Bruto del Sub sector agrícola, convirtiéndose en el segundo producto más importante de la agricultura del país, siendo solamente superado por el VBP correspondiente al arroz (13,4 %); en las dos últimas décadas la

producción de papa creció rápidamente, a una tasa de 3,4 % anual, con una alta producción histórica récord en el año 2015, de 4 715,9 mil toneladas.

En el año 2016, la producción nacional total fue de 4 527,6 mil toneladas, siendo el principal departamento productor de papa la región de Puno con 691,8 mil toneladas, seguido de Huánuco (500,8 mil t), La Libertad (421,3 mil t), Apurímac (404,4 mil t) y Junín (385,7 mil t), que en conjunto aportaron con más del 53 % de la producción nacional; mientras que en la región de Ayacucho se registró 304,2 mil toneladas de producción (6,7 % del total); datos que se presentan en la Figura 2.9 (MINAGRI, 2017)

### **2.3.6 Aplicaciones de la papa**

La papa tiene una amplia gama de aplicaciones tanto industriales como domésticas, y una parte como tubérculos semilla. El consumo directo como papa fresca en la alimentación diaria sería menor del 50 % de la producción mundial, ya sean cocidas, en sopas, purés, horneadas, croquetas, ensaladas, guisos, fritos, cremas, tortillas y diversas modalidades de preparación cotidiana que varían de acuerdo a cada población y culturas consumidoras de este tubérculo; el resto de la producción mundial en la actualidad estaría destinado a diversos procesos industriales de transformación y usos alternativos de carácter industrial, especialmente en los países desarrollados, identificándose entre diversos productos procesados casos como (FAO, 2008):

- Papas precocidas y congeladas
- Hojuelas de papa
- Copos de papa deshidratada
- Papa granulada
- Papa seca
- Harina de papa
- Almidón de papa
- Fermentación y producción de bebidas alcohólicas (Vodka)
- Adhesivos
- Aglutinantes
- Texturizador y rellenos
- Producción industrial de etanol
- Combustibles biodiesel
- Pienso para amínales
- Alimentos balanceados
- Etc.

El almidón de papa es extraído comercialmente en EUA y en Europa, siendo Holanda el productor más importante de ese continente. En los EUA, cada vez es más común que la producción de almidón sea aprovechada como subproducto del procesamiento de papas fritas y es usado especialmente para engomado de tejidos y papel fino por su alta viscosidad.

En el Perú es muy común cocerla, pelarla, trozarla y secarla para su venta en los mercados internos, que es ampliamente utilizada en la elaboración de la rica **carapulcra**. Igualmente, existe la conversión de papa en **chuño**, que utiliza la helada nocturna de la sierra, obteniéndose una papa grisácea de características diferentes, ampliamente utilizada en las comidas de la zona centro sur del país; y en otras zonas, como la norte andina, se procede a la fermentación bacteriana sumergida y prolongada en pozos o estanques de agua, cuyo producto se denomina **tocosh**, con un fuerte olor característico, al cual se le atribuye incluso características medicinales.

### 2.3.7 Papa seca

La *papa seca* o papa deshidratada es el producto obtenido a partir de diversas variedades de papa fresca sometida generalmente a una cocción (que modifica la textura a la vez que inhibe el oscurecimiento enzimático) y la deshidratación para reducir el contenido de agua a niveles que permiten la preservación prolongada del alimento; de acuerdo a su presentación final, la papa seca se puede clasificar en cuatro categorías: hojuelas, harina, gránulos y piezas (trozos) de papa deshidratada, siendo la última forma la más extendida en nuestro país; la papa seca se presenta de un color blanco amarillento, según la variedad y tecnología utilizada para su elaboración. De acuerdo al Centro Internacional de la Papa (CIP) se indica que la papa seca debería tener un contenido del 10 % de humedad final, y en la partida arancelaria 07.12.90.90.00 de comercialización de papa seca se exige que el porcentaje de humedad debería ser menor al 12 %.

La elaboración de papa seca, en gran parte de los procesos de nuestro país, permite el aprovechamiento de las papas de 3ra y 4ta calidad, una vez realizada la clasificación de las cosechas; aproximadamente el 90 % de la producción total es en base a la tecnología artesanal y el resto hace uso de la tecnología intermedia (Aguilar, 2012).

En la Tabla 2.6 se presenta la composición química típica de la papa seca, la cual variará de acuerdo a la variedad y el proceso de producción.

**Tabla 2.6** Composición química de la papa seca como alimento, en base a 100 g.

Alimento: Papa Seca (100 g)			
Energía (Kcal)	322	Calcio (mg)	47
Agua (%)	14.8	Fósforo (mg)	200
Proteínas (g)	8.2	Hierro (mg)	4.50
Grasas (g)	0.7	Tiamina (mg)	0.19
Carbohidratos (g)	72.8	Riboflavina (mg)	0.09
Fibra (g)	1.8	Niacina (mg)	5.00
Ceniza (g)	3.5	Vit. C (mg)	3.20

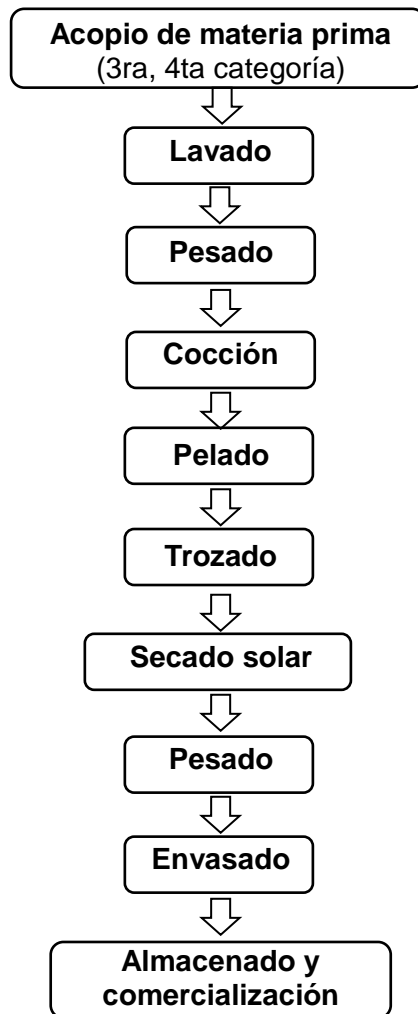
**Fuente:** Tablas Peruanas de Composición de Alimentos (2009)

### 2.3.8 Proceso de producción de papa seca

La elaboración de papa seca exige un conjunto de operaciones unitarias, que van desde la recepción de materia prima, papa fresca en la planta, hasta el envasado y almacenamiento del producto denominado como papa seca; el rendimiento podría variar de acuerdo a la materia prima y las condiciones de procesamiento, encontrándose rendimientos de unos 20 kg de papa seca por cada 100 kg de papa fresca procesada; las operaciones que pueden identificarse son (Aguilar, 2012):

- Recepción de la materia prima
- Pesado
- Selección
- Lavado
- Pelado
- Rectificado
- Cortado
- Sulfitado
- Cocinado
- **Secado**
- Molienda
- Tamizado
- Envasado
- Almacenado

El diagrama básico del proceso de producción de papa seca, con la alternativa de uso del secado solar, se expone en la Figura 2.10.



**Figura 2.10** Diagrama del proceso de producción para obtener la papa seca.

Entre las operaciones vitales del proceso de producción de papa seca se encuentran la alternativa del **sulfitado**, que consiste en sumergir las papas en una solución de bisulfito de sodio (unos 0,2 % por unos 5 min) con la finalidad de evitar las reacciones de oscurecimiento enzimático (oxidación de los fenoles de la papa) complementado por la cocción o **cocinado** que permite modificar la textura de la papa así como la consistencia, sabor y rendimiento final, también inhibe el pardeamiento enzimático; la operación principal que permite obtener la papa seca es el secado o deshidratación, que pueden realizarse bajo distintas formas de secado, como son en bandejas, secadores solares, y diversas formas de contacto sólido gas y régimen de operación.

En la guía de secadores solares para diversos productos (Almada, 2005), en el caso de la papa considera una humedad fresca de alrededor del 75 % y para la papa seca un 13 % de humedad, con una temperatura máxima tolerable para el producto de 55 °C, con un rendimiento de unos 150 a 250 g de papa seca por cada 1 kg de papa fresca procesada, bajo la técnica general de lavado, selección, pelado, corte (rodajas, cubos, rallado grueso), blanqueado (bisulfito o cocción), secado solar por unos dos a tres días relativamente bien soleados y el envasado final.

## **2.4 SECADO**

El secado es un término amplio referido a la reducción o eliminación de la humedad (líquidos) contenida en diversos tipos de materiales a través de medios mecánicos y térmicos, con distintos propósitos.

### **2.4.1 Secado de sólidos**

El secado de sólidos es una operación unitaria que consiste en reducir de manera controlada el contenido de humedad (agua) de los mismos, por medio de un agente de secado que provee el calor para la evaporación del líquido contenido en la matriz sólida y además extrae y acarrea el vapor generado y liberado por el sólido que se va secando, el agente usado comúnmente es gas caliente (aire caliente). Los sólidos pueden ser orgánicos o inorgánicos, y el secado en el contexto industrial se desarrolla al interior de los diversos tipos de secadores. En general, la operación de secado es una de las operaciones unitarias que más energía térmica consume en la industria. (Geankoplis, 1998; Henley, 2011; Mc Cabe, 2002)

En el secado de biomateriales alimentarios y otros, el proceso de deshidratación no debe alterar las características del producto tales como sabor, olor, color, consistencia, nutrientes, vitaminas, principios activos y otros indicadores de calidad de acuerdo al tipo de material; para cuyo efecto, se debe controlar la temperatura, humedad del aire y demás parámetros en el secador a través de sensores y dispositivos diseñados para dicho fin, tal que el proceso transcurra en las condiciones establecidas. El secado se puede realizar de forma tradicional con temperaturas que no sobrepasan los 55 a 60 °C, con temperaturas mayores que oscilan entre los 90 a 100 °C, en el caso de los secados por atomización se pueden operar entre unos 200 a 300 °C, así

como a temperatura bajas (congelamiento) en el caso de los liofilizadores (Sharma, 2003; Henley, 2011; Arun, 2006).

El objetivo del secado, especialmente en el caso de alimentos como es la papa, beneficia principalmente los siguientes aspectos:

- Conservación para prolongar vida de producto.
- Reducción de peso y volumen para facilitar empaque y transporte.
- Presentación de alternativas de consumo.

#### 2.4.2 Caracterización de sólidos húmedos

Para poder entender los fundamentos teóricos del secado de sólidos, como será el caso del secado de la papa, se requiere definir el contenido de humedad y tipos de humedad, como se describe a continuación:

- **Contenido de humedad en base húmeda**

Expresado comúnmente como porcentaje en peso de agua o humedad (% h) contenida en el material sólido húmedo, que para fines de cálculo se expresa como fracción másica unitaria (Treybal, 1968; Geankoplis, 1998; Arias, 2011):

$$X = \frac{m_{\text{agua}}}{m_{\text{total}}} = \frac{m_A}{m_A + m_S} = \frac{\%h}{100} = \frac{X}{1+X} \quad (2.1)$$

Donde:

x	Fracción másica de agua o humedad del sólido
X	Humedad absoluta o en base seca (kg <sub>A</sub> /kg <sub>S</sub> )
m <sub>A</sub>	Masa de agua contenida en el material sólido húmedo
m <sub>S</sub>	Masa de materia seca o matriz sólida contenida en el material sólido húmedo
% h	Porcentaje de humedad del material sólido húmedo

- **Contenido de humedad en base seca**

Expresa la relación o proporción existente entre la masa de agua por unidad de materia seca contenida en el sólido húmedo, útil para la evaluación del balance de materia en secadores, su expresión es:

$$X = \frac{m_{\text{agua}}}{m_{\text{materia seca}}} = \frac{m_A}{S_p} = \frac{x}{1-x} \quad (2.2)$$



Donde:

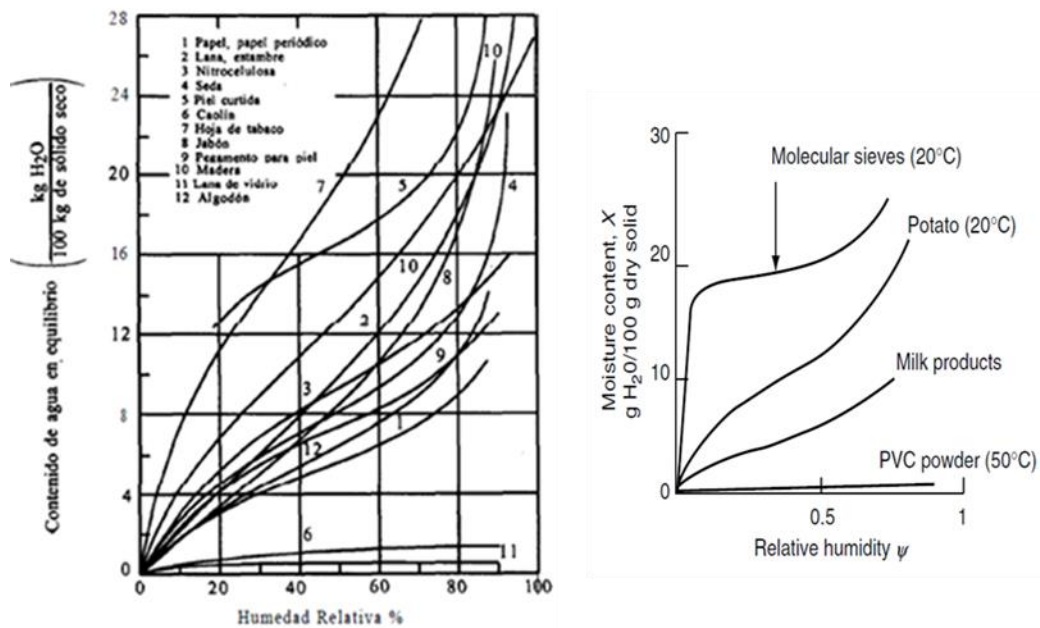
X	Humedad absoluta o en base seca (kg <sub>A</sub> /kg <sub>S</sub> )
m <sub>A</sub>	Masa de agua contenida en el material sólido húmedo
Sp=m <sub>S</sub>	Sólido portante o materia seca
x	Fracción másica de agua o humedad del sólido

- **Humedad de equilibrio**

Cuando un sólido húmedo se pone en contacto prolongado con aire de temperatura y humedad determinadas y constantes se alcanzarán las condiciones de equilibrio entre el aire y el sólido húmedo; luego, la humedad del sólido en dichas condiciones se conoce como la humedad absoluta de equilibrio:  $X^*$  o  $X_{eq}$ , definidas a través de las isothermas de equilibrio por adsorción o desorción, que dependen de cada tipo de material sólido, tal como se presenta en la siguiente Figura 2.11.

- **Humedad libre:**

Es la diferencia entre la humedad contenida en el sólido y la humedad de equilibrio con el aire bajo ciertas condiciones ( $X - X^*$ ), durante el secado del sólido la humedad que se elimina como máximo es la humedad libre, vale decir sólo hasta la humedad de equilibrio, después de un tiempo de contacto prolongado con el aire.



**Figura 2.11** Humedad de equilibrio de algunos sólidos en aire (Geankoplis, 1998; Arun, 2006)

- **Entalpía específica del sólido húmedo:**

Es la expresión de la energía específica del sólido húmedo expresado por unidad de matriz seca o materia seca, útil para la evaluación del balance de energía:

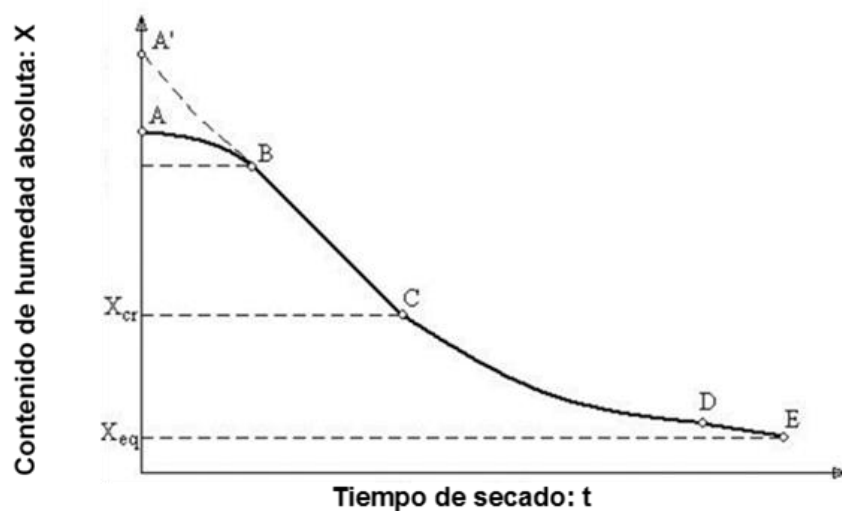
$$H = (C_{p_s} + C_{p_L} X)(T - T_0) \quad (2.3)$$

Donde:

H	Entalpía específica del sólido húmedo (kcal/kg <sub>s</sub> .°C)
X	Humedad absoluta o en base seca (kg <sub>A</sub> /kg <sub>S</sub> )
C <sub>pL</sub>	Calor específico del líquido (agua) (kcal/kg <sub>A</sub> .°C)
C <sub>pS</sub>	Calor específico de la materia seca o matriz sólida
T	Temperatura del sólido húmedo (°C)
T <sub>0</sub>	Temperatura de referencia (≈ 0 °C)

### 2.4.3 Velocidad y tiempo de secado

Las mediciones experimentales para el secado por lotes bajo ciertas condiciones controladas y específicas, permite establecer algunos parámetros de secado con el fin de determinar tiempos de secado y proponer el tamaño del equipo. Cuando una carga de sólidos húmedos se somete a secado bajo ciertas condiciones, se reportan un conjunto de curvas de secado, que expresan la disminución de la humedad del sólido en función del tiempo, que permiten evaluar la velocidad de secado y la humedad crítica, estableciendo y diferenciando la zona antecrítica y postcrítica en los periodos del secado.



**Figura 2.12** Curva de secado para la disminución de la humedad absoluta del sólido en el tiempo (Treybal, 1968)

Cuando un sólido inicia su secado, se establece un periodo muy corto de adaptación térmica o acondicionamiento (tramo AB de la Figura 2.12), luego se manifiesta el periodo de secado a velocidad constante (tramo BC) caracterizado por presentar una velocidad de secado constante con evaporación superficial predominante a una tasa constante hasta alcanzar el punto crítico ( $X_C$  ó  $X_{cr}$ ), luego del cual prosigue el periodo de secado a velocidad decreciente (tramo CD) caracterizado por la eliminación cada vez más lenta de la humedad debido al movimiento capilar y difusional desde la matriz porosa interna del sólido hacia la superficie para su arrastre por el gas; si el sólido permanece por tiempo prolongado (tramo DE) se llegaría al mínimo nivel de humedad absoluta en el sólido, indicado como la humedad de equilibrio ( $X^*$ ) con el gas de la cámara de secado (Treybal, 1968; Arias, 2011)

La **velocidad o rapidez de secado** expresa la tasa de pérdida del líquido ocluido en el sólido expresado como humedad por unidad de tiempo y por área unitaria de exposición para el secado (área de contacto sólido – gas), bajo ciertas condiciones específicas de secado; la rapidez de secado, también conocido como la densidad de flujo másico o flux de materia líquida evaporada desde la superficie del sólido (masa líquido/(tiempo).(área)) se puede determinar a partir de la información contenida en la curva de secado de la Figura 2.12; para lo cual previamente se define la velocidad de secado como:

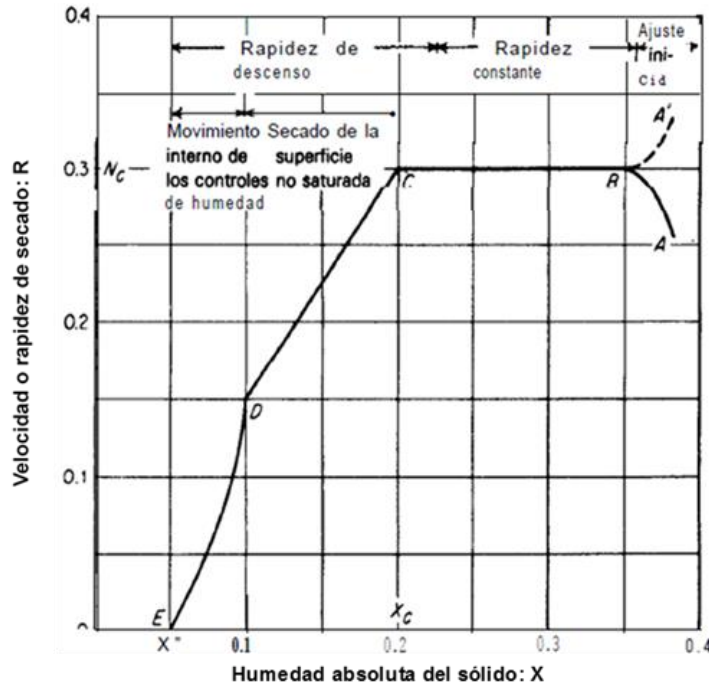
$$R = -\frac{S_p dX}{A dt} \approx -\frac{S_p \Delta X}{A \Delta t} \quad (2.4)$$

Donde:

R	Velocidad de secado del sólido húmedo ( $kg_A/m^2.h$ )
$S_p$	Sólido seco o materia seca ( $kg_s$ )
A	Área del sólido expuesto al secado con el gas ( $m^2$ )
X	Humedad absoluta o en base seca ( $kg_A/kg_s$ )
t	Tiempo de secado transcurrido (h)

La magnitud de la variación de la humedad con el tiempo del secado del sólido ( $dX/dt$ ) se obtiene como pendientes de la Figura 2.12 y expresan la rapidez de secado en la ecuación anterior, que para fines prácticos se puede estimar como una variación de la humedad absoluta en un intervalo de tiempo de secado ( $\Delta X/\Delta t$ ), siempre que éstos intervalos no sean muy grandes; luego, resulta mucho más útil la información paramétrica del secado que se obtiene a partir de la curva de humedad (Figura 2.12) aplicando la velocidad de secado

(R), tal como se representa en la siguiente Figura 2.13 que es la curva típica de la velocidad de secado de materiales sólidos bajo condiciones controladas y constantes establecidas en la cámara de secado (Geankoplis, 1998; Treybal, 1968; Arias, 2011).



**Figura 2.13** Curva típica de velocidad de secado de un sólido bajo condiciones de secado constantes (Treybal, 1968)

Con los parámetros obtenidos a partir de la Figura 2.13 (humedad crítica:  $X_c$  y la velocidad de secado constante para el periodo antecrítico:  $R_c$ ) se puede estimar el **tiempo de secado** ( $\theta_s$ ) de un sólido húmedo en una cámara de secado, manteniendo las mismas condiciones de operación, como una solución analítica de la ecuación de velocidad de secado por integración de la variación de la humedad absoluta entre la humedades inicial ( $X_F$ ) y la humedad final ( $X_W$ ) del sólido sometido a secado, siendo:

$$\theta_s = \frac{Sp}{A} \int_{X_W}^{X_F} \frac{dX}{R} \quad (2.5)$$

Donde:

- R Velocidad de secado del sólido húmedo ( $\text{kg}_A/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ )
- $X_F$  Humedad absoluta inicial del sólido ( $\text{kg}_A/\text{kg}_S$ )
- $X_W$  Humedad absoluta final del sólido ( $\text{kg}_A/\text{kg}_S$ )
- Sp Sólido seco o materia seca ( $\text{kg}_S$ )
- A Área del sólido expuesto al secado con el aire ( $\text{m}^2$ )
- $\theta_s$  Tiempo de secado total (h)

#### 2.4.4 Características del aire de secado

Para que ocurra el secado efectivo del sólido húmedo es indispensable conocer y controlar las características psicrométricas del gas de barrido, que generalmente es aire caliente. El aire caliente permite suministrar la energía térmica que requiere el líquido ocluido en el sólido para vencer el calor latente de vaporización y así desprenderse de la superficie de secado del sólido, provocando la transferencia de masa del vapor de agua superficial hacia la corriente de aire, que indiscutiblemente genera la humidificación del aire.

El estudio y caracterización del aire húmedo es amplio; sin embargo, para el secado es importante conocer también la humedad absoluta del aire:  $\mathcal{X}$  ó  $\mathcal{Y}$  ( $\text{kg}_A/\text{kg}_{G \text{ seco}}$ ), que es la relación entre la masa de vapor y la masa de gas seco, determinada a cierto valor de temperatura y presión de operación; sin embargo, es usual referirse al porcentaje de humedad relativa:  $\mathcal{X}_R$  ó **HR** (0 al 100 %), que representa la expresión porcentual de la presión de vapor de agua vigente en el gas húmedo con respecto a su presión de vapor saturado; en términos prácticos para la operación de secado se tiene que, cuando se incrementa más la temperatura del gas, se incrementa la disponibilidad térmica para la evaporación del líquido, se reduce la humedad relativa del gas incrementando el potencial de secado del gas, sin que el aumento de temperatura exceda los límites de deterioro o desnaturalización de los sólidos orgánicos o biológicos, y cuando el aire tiende hacia el estado de la saturación (evitar que tienda al 100 % de humedad relativa) disminuirá significativamente su potencial de secar al sólido (Geankoplis, 1998; Arias, 2011)

#### 2.4.5 Factores que intervienen en el proceso de secado

Existen factores que afectan la velocidad de secado, que están vinculadas a las características del gas de barrido o aire caliente utilizado para el secado y las características del sólido húmedo y su exposición al gas, entre las cuales se pueden mencionar los siguientes aspectos:

- Características del aire caliente usado para el secado: temperatura, humedad relativa y presión del aire, adquiriendo mayor potencial de secado cuando el aire no está saturado.
- Grado de convección interna del aire o velocidad de circulación superficial sobre el sólido, un alto movimiento convectivo del gas provoca un incremento de los coeficientes convectivos de transferencia de calor y masa, incrementando la velocidad de secado del sólido.

- Espesor y distribución uniforme del sólido sobre las bandejas de secado, un menor espesor de sólido permite mayor facilidad en la eliminación del líquido en forma de vapor.
- Área de secado o exposición del sólido húmedo al aire caliente, tal que a mayor área de secado se incrementa la velocidad de secado.
- Características físicas del sólido húmedo, tales como porosidad, tamaño de partícula, encogimiento o contracción de sólido por efecto del secado, tendencias a formación de costras superficiales y otras que podrían bloquear el secado efectivo.
- Contenido de humedad inicial en el sólido, humedad libre, humedad crítica, humedad de equilibrio y aspectos de capilaridad y difusión interna que retrasan la velocidad de secado.
- Temperatura límite o de degradación o desnaturalización que podría afectar a ciertos componentes presentes en el sólido húmedo.

#### **2.4.6 Balance de materia y energía en el secado de sólidos**

El secado de sólidos como operación unitaria debe cumplir con la ecuación de balance de materia y el requerimiento de energía térmica que exige su secado; para el caso de una carga batch de una determinada cantidad de sólidos húmedos en un determinado tipo de secador, con condiciones externas relativamente invariables como es el caso del aire caliente que rodea al lecho de sólidos, tal como ocurre en las cámaras de secado, se debe evaluar el balance de materia para el sólido sometido a secado y determinar el calor neto requerido por el sólido durante el tiempo total de secado (Arias, 2011; Geankoplis, 1998; Mc Cabe, 2002)

##### **Balance de materia para el sólido:**

El balance de materia global para los sólidos sometidos al secado y para el contenido de humedad o agua en el sólido en función a la fracción de agua en base húmeda es:

$$\begin{aligned}
 F &= W + V \\
 Fx_F &= Wx_w + V
 \end{aligned}
 \tag{2.6}$$

Sin embargo, es recomendable realizar el balance de materia en base seca utilizando la humedad absoluta para el agua contenida en el sólido:

$$\begin{aligned} SpX_F &= SpX_W + V \\ Sp &= F(1 - x_F) \end{aligned} \quad (2.7)$$

Donde:

F	Carga inicial total de la materia húmeda (kg)
W	Descarga final de la materia seca (kg)
V	Cantidad de agua eliminada como vapor durante el secado (kg)
$x_F$	Fracción de humedad inicial del sólido cargado, en base húmeda
$x_W$	Fracción de humedad final del sólido seco, en base húmeda
$X_F$	Humedad absoluta inicial del sólido, en base seca (kg <sub>A</sub> /kg <sub>S</sub> )
$X_W$	Humedad absoluta final del sólido, en base seca (kg <sub>A</sub> /kg <sub>S</sub> )
Sp	Sólido seco, sólido portante o materia seca (kg <sub>S</sub> )

### Requerimiento de energía térmica neta para el secado del sólido:

El calor neto que requiere el secado de una determinada carga de sólidos húmedos dispuestos al interior de una cámara de secado está en función a las características térmicas y los cambios de humedad que sufre la carga sólida durante el secado; además, considerando que las características psicrométricas del aire caliente usado para el secado se mantiene relativamente constantes en el tiempo, desarrollando un secado adiabático al interior de la cámara aislada, debido a que la energía térmica que toma el sólido en la cámara proviene estrictamente del aire caliente que circula a través del lecho sólido, se puede determinar el calor neto para el secado de los sólidos con la siguiente expresión:

$$Q_{ns} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 \quad (2.8a)$$

$$Q_1 = Sp.Cp_S (T_W - T_F)$$

$$Q_2 = (Sp.X_F).Cp_w (T_{IS} - T_F)$$

$$Q_3 = V.\lambda_w \quad (2.8b)$$

$$Q_4 = (Sp.X_W).Cp_w (T_W - T_{IS})$$

$$Q_5 = V.Cp_v (T_g - T_{IS})$$

Donde:

$Q_{ns}$	Calor neto requerido para el secado del sólido
$Q_1$	Calentamiento de la matriz sólida o sólido portante
$Q_2$	Calentamiento inicial del agua del sólido hasta la temperatura de interface sólido gas del periodo antecrítico
$Q_3$	Calor para la evaporación del agua eliminado en el secado
$Q_4$	Recalentamiento del agua residual hasta la temperatura de descarga del sólido

$Q_5$	Recalentamiento del vapor desprendido en la interface hasta la temperatura del aire vigente en la cámara de secado
$S_p$	Sólido portante o matriz seca del material sometido a secado
$V$	Líquido eliminado como vapor durante el secado
$X_F$	Humedad absoluta inicial del sólido, base seca (kg <sub>w</sub> /kg <sub>s</sub> )
$X_W$	Humedad absoluta final del sólido, base seca (kg <sub>w</sub> /kg <sub>s</sub> )
$C_{p_S}$	Calor específico de la matriz sólida
$C_{p_w}$	Calor específico del líquido que humedece al sólido.
$C_{p_v}$	Calor específico del vapor eliminado durante el secado
$\lambda_w$	Calor latente de vaporización en las condiciones de la interface
$T_F$	Temperatura inicial del sólido cargado a la cámara
$T_W$	Temperatura final de descarga del sólido
$T_g$	Temperatura del gas de secado utilizado en la cámara
$T_{IS}$	Temperatura de la interface sólido gas (secado adiabático)

#### 2.4.7 Sistemas de secado

En términos generales podemos identificar dos grandes sistemas o métodos para el secado de materiales sólidos, especialmente granos, cereales y otros productos agrícolas, estos son (Simá, 2009):

- **Secado natural.** Es el secado en las condiciones ambientales normales, que puede ser por exposición directa al sol o a la sombra; ampliamente usado a nivel doméstico en regiones con condiciones climáticas favorables para el secado natural, como son medias y altas temperaturas, bajas humedades relativas del aire y ventilación apropiada; los sólidos se extienden sobre lonas u otros materiales a ras de piso, usan la energía térmica del medio y los costos operativos son bastante bajos, con algunas desventajas como la intemperie y susceptibilidades de contaminación.
- **Secado artificial o mecánico.** En este caso los materiales sólidos (granos, cereales y otros) se depositan sobre diversos tipos de contenedores o bandejas a manera de lechos o capas, por medio del cual circula aire caliente bajo algún tipo de circulación forzada para provocar el secado controlado y supervisado bajo ciertos parámetros operativos y obtener un producto homogéneo con buena calidad final; operación que ocurre al interior de un determinado tipo de maquinaria o equipo de secado, con características y diseño específico, que permita el secado del material.

El secado de sólidos es una de las operaciones unitarias más antiguas de la ingeniería química, reportándose a la actualidad más de 400 tipos de secadores, de las cuales unos 100 tipos son disponibles y aplicables en mayor



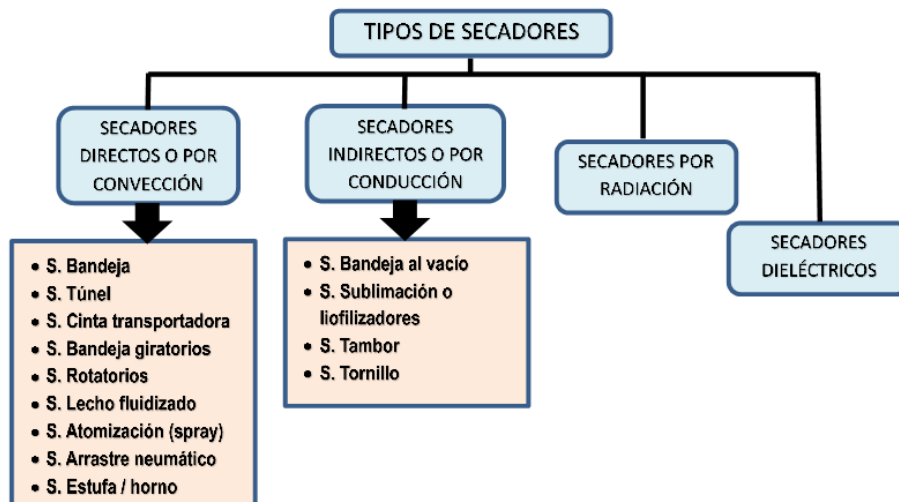
extensión en la industria, caracterizados por el uso intensivo de energía térmica (cerca del 85 % son *secadores directos* con aire caliente, como se puede ver en el esquema de la Figura 2.14) para vencer el calor latente de vaporización del líquido contenido en el sólido y provocar su vaporización y eliminación que conduce al secado del sólido (Arun, 2006).



**Figura 2.14** Esquema básico de un secador directo que usa aire caliente como agente de secado.

#### 2.4.8 Clasificación de secadores

La clasificación de secadores depende del régimen de operación de los sólidos húmedos (cargas y continuos), de la presión de operación, naturaleza y disposición de los sólidos en el equipo, modo de la transferencia de calor, condiciones estáticas o dinámicas del sólido (lechos fijos, fluidizados, dispersos) y otros aspectos; dado que la principal fuente para el secado es la concurrencia de energía, se acostumbra clasificar de acuerdo a la transferencia de energía térmica (calor) hacia el material sólido, tal como se expone en el siguiente esquema de la Figura 2.15 (adaptados de: Arun, 2006; Perry, 2008).



**Figura 2.15** Clasificación de secadores de acuerdo al mecanismo de transferencia de calor hacia el sólido.

Algunos secadores industriales pueden utilizar una combinación de mecanismos, como son los secadores mixtos en algunos secadores tipo tambor giratorio, que usan la acción directa del gas de secado y la transferencia conductiva (indirecta) a través de las superficies del propio tambor.

En vista que la mayoría de los secadores trabajan por convección; vale decir que, el sólido utiliza directamente la energía térmica del aire caliente, es importante el sistema de calentamiento térmico del aire previo a su inyección en los compartimientos del secador adiabático, para lo cual el aire pasa a través de un calentador, intercambiador de calor o quemadores, que transfieren energía térmica procedente de:

- Quema directa de combustibles, ya sean sólidos, líquidos o gaseosos (carbón, diesel, bunker, GLP, gas natural, etc.)
- Vapor de agua (suministrada por calderos)
- Sistemas eléctricos (resistores, calentadores)
- Energía solar (conversión fototérmica)
- Otras fuentes de energías térmicas.

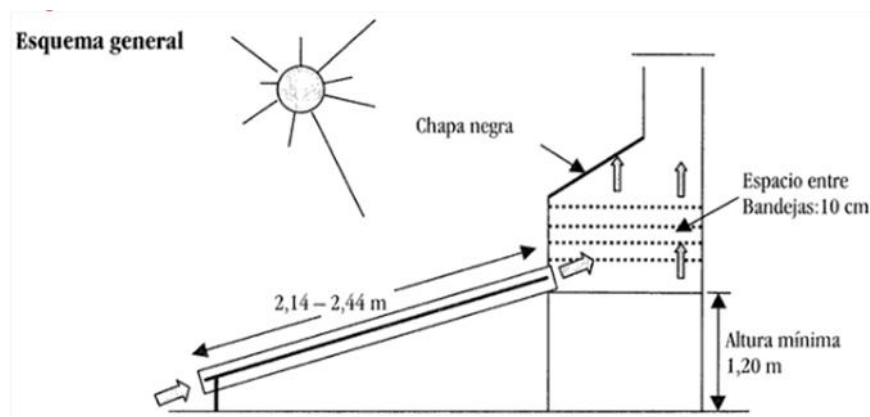
## 2.5 SECADORES SOLARES

Los secadores solares son equipos que hacen uso de la energía solar, como una alternativa de energía primaria, limpia y renovable, en cuyo diseño se aprovecha el alto índice de irradiación solar diaria disponible naturalmente por muchas regiones, para obtener el calor requerido para el secado de los materiales sólidos, como es el caso del secado de la papa seca; la clasificación de los secadores solares depende de la naturaleza del material a secar, las fuentes de energía utilizadas, reportándose a la actualidad una gran variedad de secadores solares, de acuerdo al modo del calentamiento solar se pueden clasificar en (Arun, 2006; Rivasplata, 2003):

- 1) Secadores solares directos
- 2) Secadores solares indirectos**
- 3) Secadores solares mixtos

En los secadores solares directos la radiación solar incide sobre cubiertas transparentes, que generan calor al interior de la cámara, en la cual se encuentran los materiales a secarse, con opción de recibir directamente parte de la radiación que atraviesa las cubiertas.

Por otra parte, los **secadores solares indirectos** están conformados básicamente por un panel o *colector solar* en la cual incide la radiación solar con la finalidad de calentar el aire que asciende a lo largo del panel inclinado, para luego ingresar al compartimiento de la *cámara de secado* (que opera en sombra u oscuridad), sin que en ella exista la exposición directa del producto a la radiación solar, produciendo el secado (secado directo por convección en la cámara interna) de los materiales distribuidos en bandejas y retirándose el aire húmedo de manera permanente por la parte superior abierta de la cámara de secado, tal como se percibe en la Figura 2.16.



**Figura 2.16** Esquema típico de un secador solar indirecto con un colector y cámara de secado con bandejas.

De acuerdo a su estructura constructiva y naturaleza de secado del material se pueden distinguir (Yenque, 2001):

- 1) Secador de gabinete o armario (tipo Brace o Lawand)
- 2) Secador de chimenea
- 3) Secador directo tipo carpa o invernadero
- 4) Secador tipo túnel
- 5) Otros tipos

### 2.5.1 Secador solar indirecto

En estos equipos, como se ha indicado, la radiación solar no incide directamente sobre los productos a secarse, y su estructura constructiva y operativa del equipo está conformado por dos componentes fundamentales (Arun, 2006):

- 1) Colector, que convierte la radiación solar en calor
- 2) Cámara de secado, espacio o compartimiento donde se secan los materiales sólidos

Complementariamente se pueden identificar:

- Fuente de energía auxiliar (convencional, para su funcionamiento en días nublados o por las noches)
- Equipos de convección forzada para el movimiento y flujo del aire (ventiladores)
- Instrumentos de medición y control
- Ductos, tuberías y accesorios de instalación
- Estructura de soporte

### 2.5.2 Colector solar

El colector solar, conocidos también como captador, placas, módulos o panel solar térmico es un dispositivo tipo caja rectangular inclinado y orientado hacia el sol que recibe directamente sobre una superficie la radiación solar para convertirlo en energía térmica al interior del dispositivo gracias al efecto invernadero creado al interior de la caja (aprovechamiento fototérmico), la cual es captada por un fluido, en el caso del secador solar el calor es absorbido por el aire ambiental que ingresa por la parte inferior de la caja y circula por convección natural ascendente incrementando su temperatura y potencial de secado.

Los colectores solares se pueden clasificar en dos grandes grupos: sin concentración y con concentración, con características que se describen en la Tabla 2.7; para los secadores solares son aplicables los colectores sin concentración tipificados como colector plano.

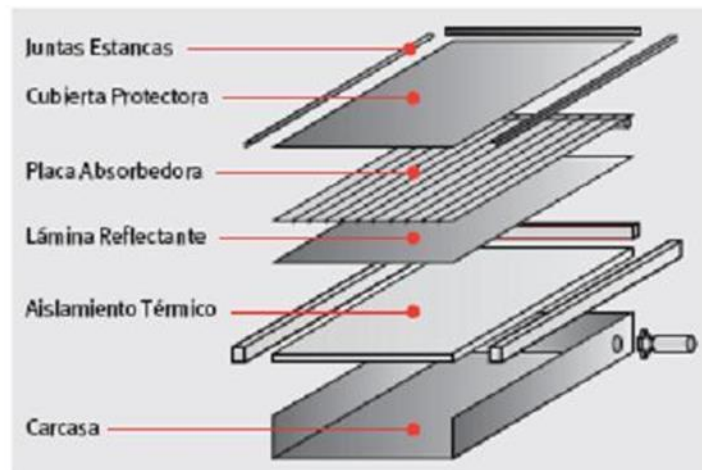
**Tabla 2.7** Comparación entre los grupos de colectores solares

Colector plano	Colector de concentración
1) Capta la suma de la energía directa y de la difusa 2) Tiene una sola orientación 3) Instalación estática 4) Temperatura < 90 °C	1) Solo capta la energía directa 2) Debe orientarse directamente al Sol 3) Reorientación permanente hacia la posición del Sol 4) Temperatura > 90 °C

**Fuente:** PROGENSA (2009)

Los colectores con cubierta plana transparente, que puede ser vidrio, polímeros transparentes, policarbonato y otros, permiten ingresar a los rayos solares

hacia la superficie del colector interno o placa absorbente con alto coeficiente de absorción a la radiación y que es recomendable que sea de color negro (ver las capas en la Figura 2.17), en la cual la energía radiante se convierte en energía calorífica a modo de efecto invernadero, provocando incrementos de temperatura interna que pueden alcanzar hasta los 90 °C.



**Figura 2.17** Componentes básicos de un colector solar plano.

El principal parámetro de un colector solar plano es la **curva de rendimiento** o **eficiencia**, definida por la relación entre el flujo energético que llega a la superficie del colector y la energía útil transmitida al fluido que absorbe la energía térmica, variando de acuerdo al nivel de radiación incidente, la temperatura de entrada del fluido, los materiales utilizados en la construcción del colector, el grado de aislamiento, la convección (vientos) externa o el entorno climático.

Los paneles solares térmicos, certificados por un laboratorio de ensayos y homologado de acuerdo a la norma UNE-EN 12975-2:2006, presentan una curva de rendimiento energético, que poder ser lineal (curva de primer orden) y la curva cuadrática (curva de segundo orden); éstas se obtienen a partir de la siguiente ecuación general del rendimiento de un colector:

$$\eta = \eta_0 - k_1 \frac{(T_m - T_a)}{I} - k_2 \frac{(T_m - T_a)^2}{I} \quad (2.9)$$

Donde:

$T_m$	Temperatura media del colector
$T_a$	Temperatura del ambiente exterior
$I$	Radiación solar global ( $W/m^2$ )

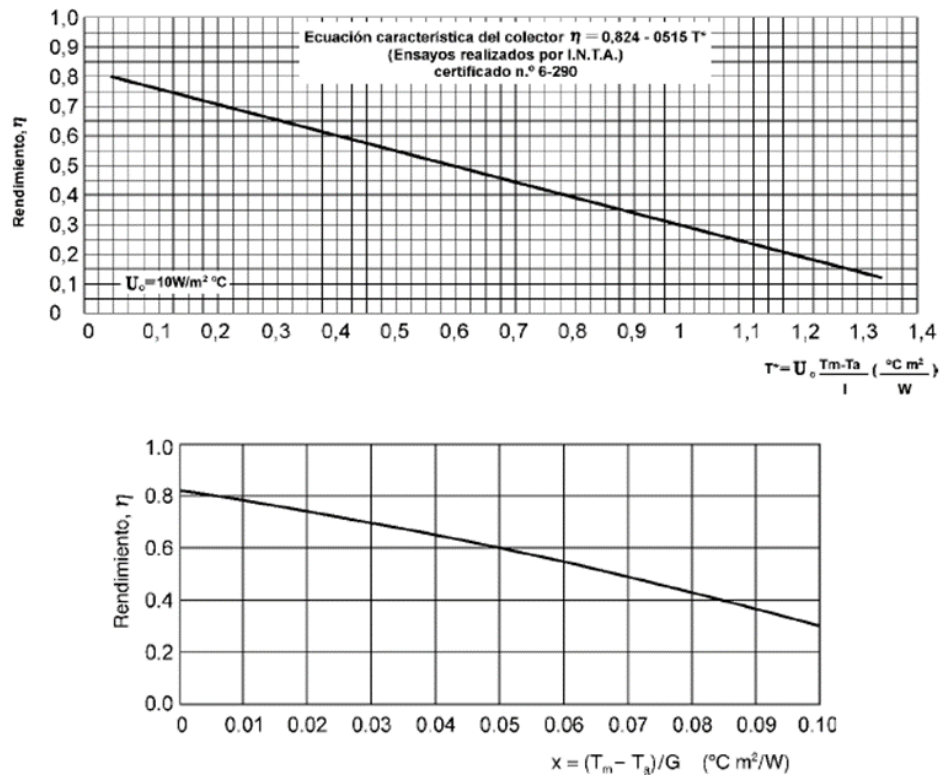
- $k_1, k_2$  Coeficientes de pérdida
- $\eta_0$  Eficiencia máxima o factor óptico
- $\eta$  Rendimiento del colector

Para un rendimiento lineal se desprecia el segundo término, quedando la expresión como sigue:

$$\eta = \eta_0 - k_1 \frac{(T_m - T_a)}{I} = \eta_0 - k_1 X \quad (2.10)$$

En las informaciones técnicas de paneles solares comerciales se pueden reportar valores de factor óptico de 0,60 a 0,80 y con coeficientes de pérdidas lineal de unos 3 a 9 W/m<sup>2</sup>.K; considerando niveles de radiación solar global para un día soleado de hasta unos 800 W/m<sup>2</sup>.

En la Figura 2.18 se puede apreciar los gráficos normalizados que expresan el rendimiento de un colector solar en función a la temperatura y la intensidad radiante, en el primer gráfico para una expresión lineal y en el segundo gráfico para una expresión de segundo grado, según norma EN 12975-2.



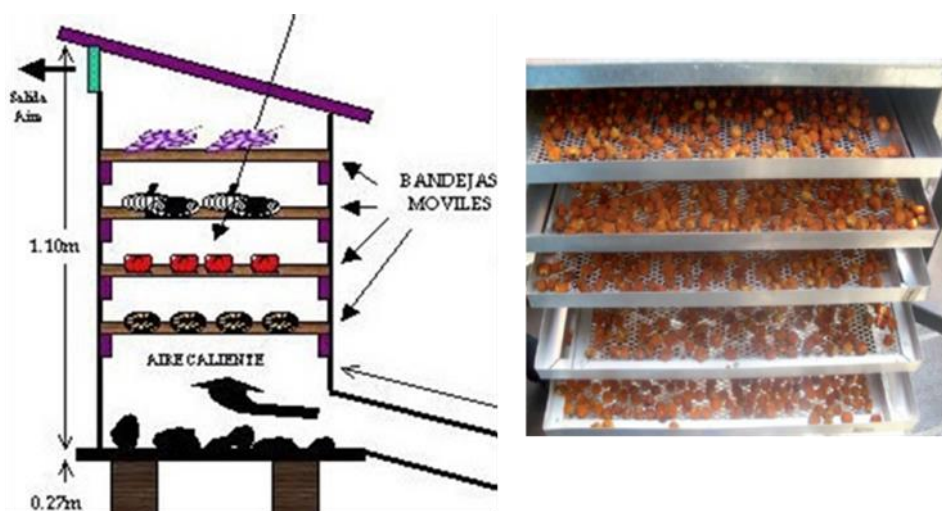
**Figura 2.18** Gráficos normalizados del rendimiento de un colector solar (PROGENSA, 2009)

Algunos prototipos de colectores solares de aire de unos 2 m de largo, 1 m de ancho y con 13 cm de espesor de caja, construido en acero comercial y lámina galvanizada para la estructura, con cubierta superior de vidrio y fibra de vidrio para aislamiento interior y alrededores reportan una eficiencia máxima de 54,5 %, y para dimensiones de 2 m x 0,7 m x 18 cm de alto se reporta una eficiencia máxima del 74 % (Simá, 2009).

### 2.5.3 Cámara de secado

Es el gabinete, cabina, estante o compartimiento, que contiene el conjunto de bandejas, sobre las cuales se depositan los sólidos a secar a manera de lecho o cama estática; que se encuentra conectado al aire caliente proveniente o suministrado desde el colector solar, la cual ingresa a la cámara por convección natural o forzado, provocando el secado adiabático del lecho de sólidos, descargándose luego el aire húmedo por la abertura de la parte superior de la cámara; siendo una regla general de que, la superficie del colector solar debe ser unas tres veces más que la superficie del lecho de sólidos extendidos en las bandejas.

La figura 2.19 ilustra las características de una cámara de secado, que constituye una cabina, compartimiento o cámara, cuyo volumen están en acorde a la capacidad o cantidad de material sólido a distribuir sobre las bandejas, por las cuales debe circular el aire caliente proveniente del colector solar; los componentes principales son (García, 2012):



**Figura 2.19** Esquema de la cámara de secado conectado al aire caliente ascendente y distribución de bandejas.

- Carcasa: estructura externa de la cámara, que provee la rigidez y conformación estructural, que soporta la intemperie.
- Cámara interna: cubierta interna que está en contacto con el material, para el caso de alimentos es una placa de acero inoxidable
- Aislamiento térmico: para reducir las pérdidas de energía térmica en la cámara de secado, va entre la carcasa y la cámara interna.
- Bandejas: recipientes, charolas o soportes sobre las cuales se extienden los sólidos húmedos, a manera de lecho para su secado, pueden ser placas, placas perforadas o mallas, y su número varía de acuerdo a la capacidad de carga a secarse.
- Ventilación: es la manera como circula el aire caliente proveniente del colector solar alrededor del lecho de sólidos, que normalmente puede ser por convección natural; en casos de mayor capacidad se pueden instalar ventiladores para provocar la convección forzada del aire y mejorar el contacto gas sólido, para incrementar la velocidad de secado por incrementos de los coeficientes convectivos de transferencia de calor y masa.

#### 2.5.4 Aspectos constructivos de secadores solares

Varían de acuerdo al nivel de incidencia solar, las características ambientales, la capacidad de procesamiento de material húmedo a secar, la naturaleza del sólido y diversos aspectos operativos; a continuación se reporta los aspectos básicos para el dimensionamiento de los principales componentes:

##### Colector solar de placa plana

El área del colector es directamente proporcional a la demanda energética para realizar el proceso de deshidratado e inversamente proporcional a la radiación solar incidente y a la eficiencia del equipo, definida a través de la siguiente ecuación (Arun, 2006; García, 2012):

$$A_C = \frac{q_u}{I\eta} \quad (2.11)$$

Donde:

$A_C$	Área del colector solar plano (m <sup>2</sup> )
$q_u$	Flujo de calor útil generado por el colector solar (kW)
$I$	Radiación solar global por día (kW.h/m <sup>2</sup> .día)
$\eta$	Eficiencia del colector.



El flujo de calor útil:  $q_u$ , se determina a partir del calor neto ganado por el fluido en el colector solar, que en el caso del secador solar está por el aire que calienta al pasar por el colector, determinado a partir de su flujo y el incremento de su temperatura, definida por la ecuación:

$$q_u = \dot{m}_{\text{aire}} C_p \Delta T = \left( \frac{Q}{V} \right) (H_2 - H_1) = G_p (H_2 - H_1) \quad (2.12)$$

Donde:

$q_u$	Flujo de calor útil generado por el colector solar
$\dot{m}_{\text{aire}}$	Flujo másico de aire que atraviesa el colector solar
$C_p$	Calor específico del aire
$\Delta T$	Diferencia de temperatura del aire ( $T_2 - T_1$ )
$Q$	Caudal volumétrico del aire a través del colector
$V$	Volumen húmedo específico del aire
$H$	Entalpía específica húmeda del aire (1: entrada, 2: salida)
$G_p$	Flujo de gas portante o aire seco ( $Q/V$ )

La eficiencia del colector solar está vinculado a las pérdidas identificadas con respecto a la energía total incidente sobre el colector, que están definidas por el tipo y calidad de materiales utilizados así como por los aspectos constructivos del colector; éstas pérdidas pueden ser bajo la forma de:

- Radiación reflejada desde cubierta (unos 10 %),
- Pérdida por radiación superficial de la cubierta (unos 8 %),
- Pérdidas térmicas por convección desde la placa absorbente y la cubierta del colector al medio ambiente (unos 20 %),
- Pérdidas por Conducción y disipación del soporte y estructura del colector (unos 4 %),

Quedando unos 58 % de la energía radiante total incidente como energía térmica útil ganada por el fluido (aire); para colectores solares planos con flujo de aire en convección natural se estiman eficiencias en un rango de 40 a 60 %.

### **Cámara de secado**

Para el diseño de la cámara de secado, concretamente el volumen de la cámara interna, dependerá principalmente de la cantidad de sólido húmedo a cargarse dentro del sistema, el espesor de la carga sólida extendida como lecho sobre las bandejas, la densidad aparente del lecho sólido, los niveles de

humedad del sólido, así como las condiciones psicrométricas del aire caliente utilizado para el secado del sólido (García, 2012).

$$V_s = \frac{m_{sh}}{\rho_a} \quad (2.13)$$

Donde:

$V_s$	Volumen de sólido húmedo a cargarse
$m_{uh}$	Peso de sólido húmedo a procesarse o cargarse en el secador
$\rho_a$	Densidad aparente del sólido a cargarse en las bandejas

En los secadores de bandejas se utilizan geometrías cuadradas y rectangulares, para alimentos se recomiendan el uso del acero inoxidable, el número de bandejas depende de la cantidad y espesor de material sólido a distribuirse, en el caso de materiales sólidos granulados es recomendable las placas perforadas e incluso mallas, porque aumentan la superficie de exposición del sólido al secado y favorecen la circulación intrapartícula del aire caliente que facilitan el secado (ver bandeja en la Figura 2.20); cuando se requieren un gran número de bandejas se recomienda usar los carritos o carretillas portabandejas, para facilitar la carga y descarga hacia la cabina del secador. Algunos criterios técnicos utilizados para el dimensionamiento de la cámara interna de los secadores y la distribución de bandejas al interior de la cámara de secado son (Geankoplis, 1998; Treybal, 1968; Mc Cabe, 2002; Perry, 2008):

- Los secadores de bandejas son de operación batch, lotes o discontinuos, recomendables para procesamiento menores a unos 200 kg/h.
- Para materiales granulados se recomiendan rejillas o mallas.
- El aislante térmico instalado entre la carcasa externa y la cámara interna está entre 7,5 a 15 cm.
- Las bandejas pueden ser cuadradas a rectangulares, con un área que varía entre 0,5 a 1 m<sup>2</sup> por cada bandeja.
- Carga de sólidos húmedos recomendado a extenderse en las bandejas: 7 a 10 kg/m<sup>2</sup>.
- Espesor del lecho o cama de sólido distribuido sobre las bandejas del secador: 1 cm a 10 cm, en algunos casos porosos hasta 15 cm.
- Espaciamiento entre bandejas, para su distribución interna en la cámara de secado: 7,5 a 10 cm
- Altura libre para circulación del aire caliente, entre la bandeja alta y el techo de la cámara interna: 25 a 40 cm

- Número de bandejas ubicadas en las cámaras de secado solar: desde unos 3 hasta 15 bandejas (dependiendo de su capacidad)



**Figura 2.20** Bandeja rectangular perforada, que se disponen al interior de la cámara de secado.

### 2.5.5 Costos de inversión y operativos

Los secadores solares tienen la gran ventaja de reducir totalmente el costo variable de energía para el secado de los materiales sólidos; en los secadores convencionales la fuente de energía para el secado proviene de diversos combustibles o energía eléctrica, que implican costos operativos bastante considerables, que podrían alcanzar en costos de combustibles de unos 2 a 4 \$/ton de material a secarse, variando de acuerdo al grado de humedad a reducirse en el material, de la eficiencia térmica y las características del secador utilizado.

En el caso de los secadores solares, al igual que en los secadores convencionales, necesariamente se tienen costos fijos vinculados a la estructura física del equipo, las cuales varían de acuerdo a la capacidad de procesamiento y la naturaleza del secador solar; para el caso de secadores convencionales de gran capacidad se pueden reportar costos de inversión de unos 170 a 680 \$/kg de producto seco, mientras que para los secadores solares se pueden requerir de unos 23 \$/kg (Espinoza, 2016); se advierte que la desventaja de los secadores solares es que su operación está sujeta a la disponibilidad de radiación solar en el día, y que en algunos casos se realizan instalaciones mixtas con calentamiento convencional, a fin de garantizar la producción continua de productos secos.

Los secadores solares directos resultan relativamente más económicos que los secadores solares indirectos, a la vez que la capacidad de operación en secadores directos tipo invernadero son bastante mayores, con la desventaja de la radiación solar directa sobre los productos.

### 2.5.6 Parámetros del secador solar indirecto

Como el secado de materiales sólidos generalmente implica la remoción térmica del contenido de humedad hasta valores finales controlados, hace que el fenómeno del secado requiera la transferencia simultánea de energía (calor) y de materia, donde la velocidad de secado dependerá considerablemente de la interacción sólido gas, como es el caso de la papa húmeda con el aire caliente, cuyos factores y parámetros se pueden analizar bajo dos condiciones del sistema de secado (Arun, 2006):

- Condiciones externas (aire caliente para el secado)
- Condiciones internas (naturaleza del sólido sometido al secado)

Las **condiciones externas** están definidas por las características del agente de secado que es el **aire caliente** que debe rodear de manera dinámica a las partículas de sólido húmedo a fin de provocar el secado, debido a la evacuación del vapor de agua que se desprende desde la superficie del sólido hacia el seno del aire, en cuyo fenómeno son determinantes establecer las siguientes condiciones paramétricas para el secado (Arun, 2006; Treybal, 1968):

1. **Temperatura**, a mayor temperatura ordinaria del aire se tiene mayor energía térmica disponible para el calentamiento, evaporación y eliminación de la humedad contenida en el sólido.
2. **Humedad**, absoluta y relativa del aire, el calentamiento del aire provoca una rápida reducción de la humedad relativa, que favorece la capacidad de secado del aire, puesto que aumenta su margen de admisión de vapor de agua; si la humedad relativa aumenta disminuye el potencial de secado, se debe evitar la saturación del aire (100 % de humedad relativa) en los sistemas de secado.
3. **Velocidad y dirección** de flujo de aire sobre el sólido, la velocidad de incidencia del gas sobre el sólido así como la dirección (superficial al lecho o intrapartícula) afectan considerablemente a los coeficientes convectivos de transferencia de calor y de materia, facilitando la evacuación de la humedad durante el secado del sólido y determinando la velocidad de secado especialmente en el periodo antecrítico; no confundir una alta convección interna del aire caliente en el interior de las cámaras de secado con el caudal o velocidad de purga del aire húmedo a fin de evitar la tendencia a la saturación.

4. **Forma física de los sólidos**, que definen la periferia del sólido para el contacto sólido gas, siendo favorables los sistemas particulados que pueden extenderse a bajo espesor en las bandejas, incrementando el área de secado y aumentando la velocidad de secado.
5. **Soportes y movimiento de los sólidos**, las bandejas y soportes tipo malla incrementan el contacto sólido gas, siendo mucho más favorable el secado cuando el lecho de sólidos se someten al movimiento mecánico, que pueden ser de volteo, rotatorios, suspensión, fluidización, etc. con respecto al aire caliente.

En la caracterización del aire húmedo y su potencial de secar materiales sólidos, a parte de la temperatura, la humedad absoluta y la humedad relativa, interesa conocer la presión de vapor del agua, la entalpía, el volumen específico húmedo, la temperatura de bulbo húmedo, la temperatura de rocío, la temperatura de saturación adiabática y otras características en el dominio de la presión; para lo cual son recomendables y prácticos el uso de los diagramas psicrométricos (ver en el Anexo 01)

Las **condiciones internas** están definidas por la naturaleza y características estructurales internas del sólido sometido a secado, que influyen en la velocidad del secado, adquiriendo el factor controlante especialmente en el periodo postcrítico del secado, reduciendo la velocidad de secado que se refleja en el incremento del tiempo de residencia del sólido en el secador hasta llegar a la humedad final deseada; estas características son:

1. **Humedad del sólido**, que va desde la humedad inicial con la cual se inicia el secado, pasando por la humedad crítica y prosiguiendo hasta la humedad final deseada; cuya variación define el tiempo de secado así como la velocidad del secado en acorde a las condiciones externas.
2. **Porosidad del material sólido**, en cuyos intersticios se aloja la humedad, que provoca una resistencia interna a la evacuación y eliminación en forma de vapor.
3. **Gradiente de temperatura**, establecida al interior del sólido, la cual favorece la migración de la humedad hacia la superficie periférica del sólido; si los gradientes de temperatura son considerables generan también un incremento de los gradientes de presión de vapor, que pueden generar agrietamientos y fracturas de los materiales sometidos a secado, como ocurre en los materiales cerámicos.

4. **Mecanismo de migración interna de la humedad**, que puede ser por difusión, flujo por capilaridad y presión interna por contracción de la zona húmeda durante el secado, que permite expulsar la humedad desde el interior del sólido hacia la superficie.
5. **Isoterma de humedad y humedad de equilibrio**, vinculado con el grado de humedad natural que los sólidos alcanzan en el equilibrio por contacto prolongado con un gas o aire de cierta humedad, que es el límite de humedad que podría alcanzar el sólido en la cámara de secado.

Finalmente, los aspectos dimensionales y operativos del secador solar indirecto influirán en el secado; de las cuales es importante mencionar con respecto a los dos componentes fundamentales:

- El colector solar plano (encargado del calentamiento del aire)
- Cámara de secado (encargado del secado del material)

En el caso del **colector solar plano**, la eficiencia operativa para la conversión de la energía radiante en energía térmica para el calentamiento del aire, quedará definido de acuerdo a la naturaleza constructiva y calidad del acabado del mismo, como son principalmente el área del colector, el color y pulido final de la superficie del colector, la opacidad del material de la superficie, la calidad del aislamiento térmico, la inclinación y ascenso natural del aire. Por otra parte, también se tienen la influencia de los aspectos ambientales como el nivel de radiación solar incidente sobre el colector que varía de acuerdo a la hora del día solar, las nubosidades, los vientos naturales alrededor del colector, las características del aire ambiental como es la temperatura ordinaria y la humedad relativa.

Y para la **cámara de secado**, que es la cabina en la cual se cargan los materiales húmedos para el proceso de secado adiabático, quedará definida por su capacidad de carga a través del número de bandejas que pueda contener, la forma de distribución y carga de sólidos húmedos por área unitaria, el espaciamiento, la homogeneidad y caudal del aire caliente suministrada desde el colector, el contacto sólido y aire establecida durante el secado, la forma de purga del aire húmedo así como el grado de aislamiento de la cámara, que repercutirán en el tiempo total requerido para el secado del material cargado.

## **CAPÍTULO III**

### **3 METODOLOGÍA**

Expresa la metodología utilizada para la ejecución operativa del trabajo experimental, definiendo las estrategias operativas con respecto a las materias primas a utilizarse, las diversas técnicas de medición y determinación, así como el requerimiento logístico de materiales, reactivos, instrumentos, equipos, herramientas en general, programas y otros que se consideren necesarios para la evaluación de los resultados.

#### **3.1 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN**

##### **Tipo de Investigación**

Es predominantemente:

- Aplicada                                      Se utiliza el conocimiento científico de las formas de energía, la conversión de energía radiante en energía térmica y su aplicación tecnológica al secado de papa cocida en trozos, como un aporte a las actividades productivas de secado de materiales con aprovechamiento y utilización de energías renovables y primarias, como es la energía solar.

El tipo de investigación aplicada enunciada, exige el desarrollo de relaciones causales entre los aspectos de energía térmica útil acarreada

por el agente de secado, que es el aire, a fin de provocar el efecto controlado del secado de materiales, como un tipo de investigación cuantitativa, que también involucra aspectos cualitativos, que permiten explicar diversos fenómenos y ocurrencias que devienen de dichas interrelaciones, que también concurre en la investigación tecnológica, porque pretende alcanzar una propuesta de elaboración y producción de papa seca, como una alternativa de procesamiento y disposición de materias primas agronómicas dentro de la región.

### **Nivel de Investigación**

Con mayor relevancia del nivel experimental; sin embargo, confluyen otros niveles de investigación de acuerdo a la extensión de la investigación, como son los siguientes:

- **Exploratoria**                      Para recabar información básica sobre fundamentos operativos de los secadores solares, prototipos de secadores solares indirectos, aspectos constructivos, instalaciones y pruebas exploratorias sobre secado de materiales, que permita afianzar la investigación definitiva.
  
- **Descriptiva**                      Recabar información técnica y científica sobre los fenómenos de la radiación solar, la conversión energética en calor, la naturaleza del secado de materiales y los aspectos técnicos y de ingeniería sobre la transferencia de masa y calor simultáneos que concurren en la operación unitaria de secado utilizando un gas, a fin de describir la operación unitaria del secado en forma aplicada.
  
- **Experimental**                      Basada en la manipulación de ciertas variables independientes del proceso de secado de papa en la cámara solar indirecta de manera controlada en el contexto tipo laboratorio utilizando el prototipo de secador solar indirecto, a fin de estudiar su influencia en los parámetros y rendimiento de producción de papa seca, considerado como el nivel más relevante con respecto a los demás niveles señalados, que



aportan o fortalecen la investigación.

- **Correlacional** Usar los resultados cuantitativos de la variación de la humedad absoluta del material en el tiempo de secado para fines de correlación y determinación de los periodos antecríticos y postcríticos del secado.
- **Explicativa** De acuerdo a la observación crítica de los fenómenos suscitados y resultados obtenidos, establecer los aspectos explicativos de la operación de secado para el caso específico de la papa cocida y trozada, en acorde a su caracterización y aspectos resistivos en la eliminación del agua desde la estructura o matriz sólida.

### **Método**

Con gran soporte experimental controlado a nivel de pseudo laboratorio en el prototipo de secador solar indirecto construido, en la cual contribuyen los métodos siguientes:

- **Deductivo e inductivo**

Debido a que los principios descubiertos sobre el uso y manejo de la radiación solar se pueden vincular a prototipos de secadores solares, así como también a partir de las leyes y fundamentos físicos de la operación unitaria del secado de materiales se pueden deducir e inducir a casos particulares, con parámetros específicos, como es el caso del secado de ciertas variedades de papa.

- **Fenomenológico** Es un método importante en las ciencias de la ingeniería, tal como es el caso del uso y aprovechamiento de las energías renovables y el estudio de la ingeniería de las operaciones de secado, porque parten de la percepción exhaustiva de los fenómenos naturales, como es el calentamiento con energía solar, la convección natural por cambio de densidad, el secado natural y

otros fenómenos sistematizados e incorporados por la ingeniería química a las operaciones unitarias.

- **Analítico**

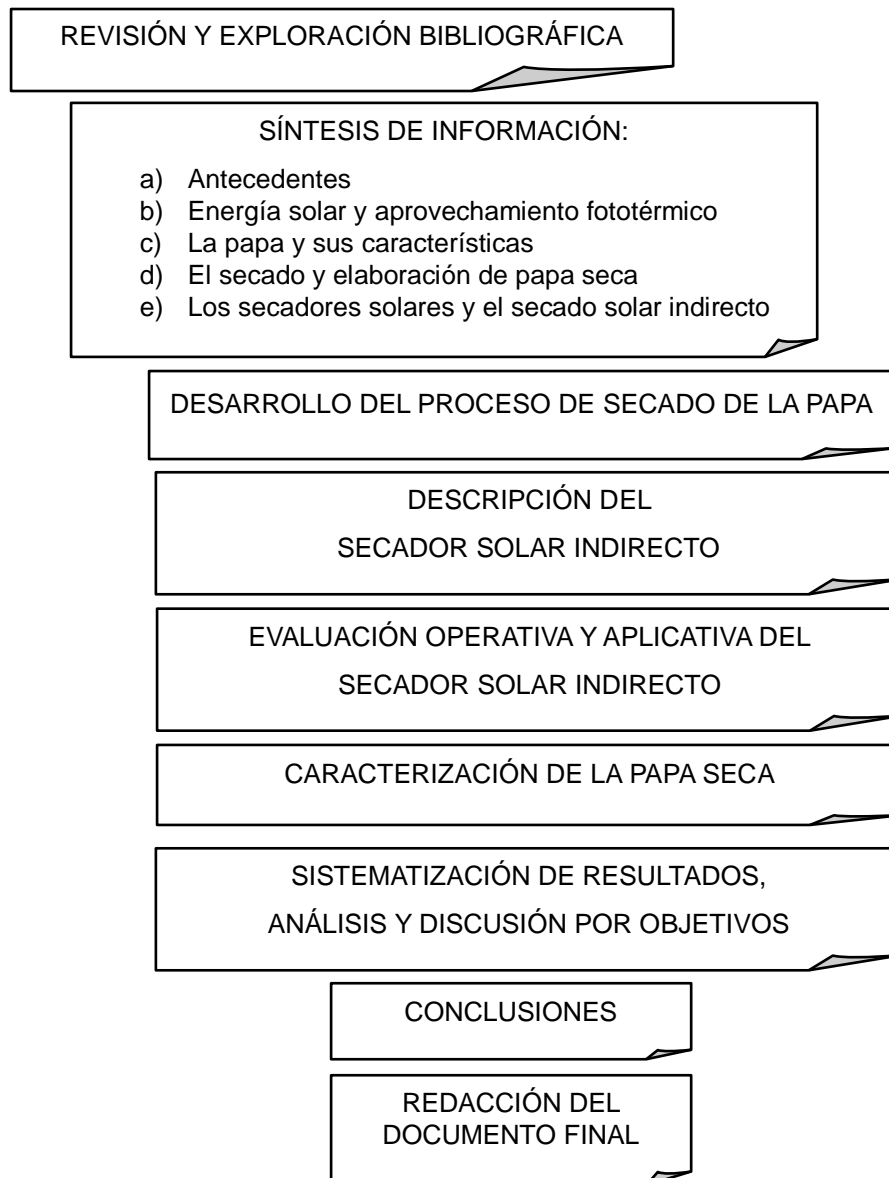
Implica el manejo de juicios y argumentos, para lo cual se emplea el análisis y síntesis, aplicado a las observaciones directas de los fenómenos, a los resultados primarios así como a los resultados correlativos y funcionales, para poder interpretar en un proceso cognoscitivo el análisis y discusión progresiva permanente, para elaborar las conclusiones pertinentes en la esencia de un proceso constructivo unitario y sostenido, para el caso tratado en la investigación.
- **Comparativo**

Dado los métodos fenomenológicos que caracterizan a los trabajos de ingeniería, los eventos aplicados en distintos lugares geográficos, territoriales, ambientales y otros, adquieren ciertas tendencias y características de similitud y de particularidad, razón por la cual es aplicable el método comparativo para extender, comprender, emitir juicios y resultados sobre eventos similares.

## **Diseño**

- Experimental progresivo por objetivos.

El tema del trabajo de investigación implica la evaluación de secadores solares de tipo indirecto en el rendimiento de la producción de papa seca, con objetivos definidos, que deben ser alcanzados de manera progresiva durante la ejecución experimental y análisis de resultados, para lo cual se considera estratégico el planeamiento operativo del diseño experimental siguiente:



### **Población**

En la formulación contextual del problema de la investigación se manifiesta el compromiso del aprovechamiento de la sobreproducción de papa en la región; por lo tanto, la población de la materia prima para el presente trabajo de investigación está constituida por las distintas variedades de papa que produce la región de Ayacucho; sin embargo, se tienen la información estadística de la producción representativa de las **variedades comerciales de papa Canchán y Yungay**, por la cual se predefinen estas dos variedades de papa de la región para el estudio.

## **Muestra**

Las variedades definidas para el estudio se pueden conseguir en el mercado local de la ciudad, con una adquisición aleatoria para evaluar sus características y utilizar sistemáticamente en los diversos ensayos de la experimentación; no se considera un dimensionamiento de muestra con respecto a la población de producción total dada en la región; en tanto que, las variedades comerciales y nativas de la papa están perfectamente definidas en su caracterización; sin embargo, se considera la evaluación de la calidad por caracterización dimensional establecida por la Norma Técnica Peruana NTP 011.119 (2010).

Con la finalidad de obtener resultados confiables y con capacidad de reproducibilidad, se define la homogeneidad de las muestras de papa utilizados en el horizonte de la investigación, para las variedades indicadas.

## **Técnicas**

De acuerdo al avance programático de actividades por objetivos, van concurriendo diversas técnicas de evaluación, tales como:

- Análisis documental.
- Observación y descripción de fenómenos
- Técnicas y estrategias constructivas del secador solar indirecto
- Técnicas de análisis y caracterización de papa
- Evaluación experimental del secado de papa en diversas condiciones
- Análisis estadístico de resultados
- Análisis de balance de materia y energía en procesos y operaciones unitarias como es el secado de sólidos
- Análisis correlacional para determinar parámetros y rendimientos

## **Instrumentos**

- Equipos y materiales de laboratorio
- Secador solar indirecto
- Instrumentos de medición diversas
- Programas básicos y herramientas estadísticos – gráficos
- Tablas y diagramas de propiedades diversas

### **3.2 DISEÑO DE FACTORES PARA LA EXPERIMENTACIÓN**

De acuerdo a las pruebas exploratorias y preliminares desarrolladas para el tema, se considera el diseño experimental para la evaluación del secador solar indirecto en el rendimiento de la producción de papa seca con los siguientes factores:

- 1) Variedades de papa : Canchán y Yungay
- 2) Superficie del colector solar : Básica (1) y de doble superficie (2)
- 3) Tipo de convección del aire : Natural y Forzada

### **3.3 DESCRIPCIÓN BÁSICA DE TÉCNICAS UTILIZADAS**

Se han utilizado diversas técnicas en la determinación y caracterización de la materia prima, en la descripción del secador solar indirecto, en el proceso productivo de elaboración de papa seca, especialmente en la evaluación del secado solar indirecto aplicado al secado de los trozos de papa cocida y la caracterización de la papa seca; las que se describen de manera básica.

#### **Determinación de humedad**

Se utiliza el determinador digital de humedad, se programa a la temperatura de 95 °C (dado que la presión local es menor que la atmosférica), luego se carga la muestra sobre la bandeja del equipo y se procede a la determinación automática del contenido de humedad, a la finalización se hace lectura de la humedad en forma porcentual en la máquina.

#### **Determinación de cenizas**

Se limpia, seca y pesa un crisol cerámico, se deposita la muestra y se registra el peso inicial, luego se lleva al horno eléctrico con control programable digital, y se lleva de manera lenta el material hasta los 650 °C por un tiempo de 4 horas netas, luego se deja enfriar naturalmente el compartimiento, se abre y pesa inmediatamente el crisol conteniendo las cenizas, para luego determinar el peso neto de cenizas y expresar en forma porcentual con respecto a la materia prima calcinada.

#### **Peso específico**

Se toma una unidad de muestra de papa, se lava con cuidado la superficie para

retirar la tierra adherida, luego se seca con un paño y se determina su peso y volumen unitario, el volumen se determina por desplazamiento de volumen de agua que provoca la inmersión de la unidad, luego se determina el peso específico como una relación entre peso y volumen.

### **Densidad aparente**

Determinado en un conjunto de partículas, en este caso para una cantidad de papa seca, la cual se carga en una probeta, luego se da un golpe suave contra una franela y se evalúa el volumen aparente total, luego se determinará la relación entre el peso y el volumen total como densidad aparente. Propiedad importante para propósitos de carga, envasados, transporte y otros fines.

### **Densidad neta**

También aplicado a un conjunto de partículas, para el caso de la papa seca se pesa una determinada cantidad y se vierte en una probeta que previamente contiene un volumen inicial definido de agua, se sumergen todas las partículas, se sacude suavemente para eliminar todas las burbujas de aire adheridas a la superficie de los trozos de papa seca y se determina inmediatamente el volumen final de agua desplazada; se determina el volumen neto de la papa seca por la variación de volumen de agua en la probeta y se determina la densidad neta de las partículas.

## **3.4 MATERIALES Y EQUIPOS**

### **Materias primas**

- Papa variedad Canchán
- Papa variedad Yunga

### **Reactivos e insumos**

- Agua destilada
- Agua corriente

### **Materiales de laboratorio**

- Probetas
- Lunas de reloj

- Espátulas
- Crisoles
- Vasos precipitados
- Regla graduada
- Cuchillos de corte

### **Instrumentos y equipos de laboratorio**

- Termómetros digitales
- Termohigrómetro digital
- Anemómetro digital
- Balanzas digitales
- Estufa de secado
- Horno mufla
- Determinador digital de humedad

### **Equipos de experimentación**

- Secador solar indirecto
- Ventilador eléctrico para la convección forzada

## **CAPÍTULO IV**

### **4 RESULTADOS EXPERIMENTALES**

En este capítulo se irá presentando progresivamente los diferentes aspectos experimentales y los resultados básicos obtenidos en el trabajo de investigación.

#### **4.1 PROCESO DE SECADO DE LA PAPA**

De acuerdo a la revisión bibliográfica, a la información directa reportada en los pequeños productores de papa seca en la región y un conjunto de pruebas preliminares de la tecnología y proceso de elaboración y producción de papa seca, se plantea el proceso de secado de papa, cuyas operaciones involucran desde la recepción de materia prima hasta el envasado del producto denominado como la *papa seca*, considerando relevante en el presente trabajo la operación de secado aprovechando la energía solar, que viene a ser una energía primaria, limpia y barata, aplicada a través de los secadores solares indirectos, constituidos por el colector solar para provocar el calentamiento del aire y la cámara de secado propiamente dicha, en cuyo interior se instalan las bandejas conteniendo a los trozos de papa para su deshidratación.

##### **4.1.1 Variedad de papa como materia prima**

Como se ha analizado en la Figura 2.9, para el año 2016 se reporta una producción de 304,2 mil toneladas de papa en la región de Ayacucho (6,7 % de





la producción nacional), constituidos principalmente por dos variedades mejoradas de papa: **Canchán y Yungay**, así como las variedades nativas comerciales: Peruanita, Tumbay y Huayro, siendo éstos últimos relativamente susceptibles a algunas enfermedades como la racha (INIA, 2010); por lo tanto, considerando los mayores volúmenes de producción con susceptibilidad a la sobreproducción y requerimientos de tecnologías alternas para el uso y aprovechamiento de la producción de la papa en la región, se ha considerado pertinente desarrollar la investigación de elaboración y producción de papa seca en un secador solar indirecto utilizando como materia prima las variedades de papa Canchán y Yungay, abastecidos en los mercados locales de la ciudad de Ayacucho.

#### 4.1.2 Caracterización de la materia prima

Se ha realizado un muestreo por cuarteo de la materia prima adquirida en el mercado local y evaluado en los laboratorios de la Facultad de Ingeniería Química y Metalurgia, reportándose las características fundamentales necesarias para el trabajo de investigación, cuyos resultados son los siguientes:

**Tabla 4.1** Evaluación de las características dimensionales de las variedades de papa utilizada como materia prima

Variedad	Característica dimensional	Calibre	Calificación (NTP 011.119)	Figura
Canchán	D mayor (mm)	43 ± 1,7 mm	TERCERA	
	D menor (mm)	39 ± 1,6 mm		
	Peso (g)	67,9 ± 2,8 g		
Yungay	D mayor (mm)	45 ± 1,8 mm	TERCERA	
	D menor (mm)	40 ± 1,6 mm		
	Peso (g)	60,9 ± 1,5 g		

**Fuente:** Elaboración propia

De acuerdo a la calificación establecida por la Norma Técnica Peruana NTP 011.119 (2010) establecidas para la comercialización de diversas variedades en el país, las muestras utilizadas para el experimento en las variedades Canchan

y Yungay se califican como calibre TERCERA, cuyos resultados se perciben en la Tabla 4.1, calidad considerada apropiada para el estudio del secado de papa; entendiéndose inclusive que, algunos productores de papa seca utilizan papas de menor calidad para la elaboración de papa seca.

**Tabla 4.2** Evaluación de las características físicas y otros de la materia prima fresca.

Característica	CANCHÁN	YUNGAY
Porcentaje de Humedad	78 ± 2,5 %	76 ± 3,1 %
Porcentaje de Materia seca	22 ± 2,5 %	24 ± 3,1 %
Cenizas (en base seca)	2,6 ± 0,1 %	2,9 ± 0,1
Peso específico	1,11 ± 0,05 g/mL	1,10 ± 0,04 g/mL
Precios unitarios	S/ 1,00/kg ± 0,30	S/ 1,00/kg ± 0,30

**Fuente:** Elaboración propia

En la Tabla 4.2 se reporta que la humedad de la papa fresca adquirida en el mercado se encuentra entre los 76 a 78 %, compatibles con la información reportada en la bibliografía (ver Tabla 2.4), las cenizas están expresada en porcentaje con respecto a la materia seca; además, su peso específico es mayor a la del agua, propiedad que hace que la papa fresca se hunda en el agua; los precios unitarios por kg de papa varían de acuerdo a la estacionalidad, la campaña de producción y otros factores, que también han de ir afectando algunas características como es la humedad, tales como en ocasiones que los periodos de almacenamiento y comercialización vayan prolongándose.

Como es de información común, al pelar o efectuar el corte en el tubérculo de la papa fresca, se observa una textura blanca al inicio, que luego se va pardeando o ennegreciendo de manera gradual, debido al pardeamiento enzimático (PE) vinculado con la actividad de la enzima polifenol oxidasa (PPO) que cataliza la oxidación a diferentes compuestos fenólicos por acción del oxígeno ambiental, cuya pigmentación oscura no es deseable en las aplicaciones industriales.

#### 4.1.3 Proceso de elaboración y producción de papa seca

De acuerdo a la revisión bibliográfica complementados con las pruebas exploratorias a nivel de laboratorio, se consolidan y proponen las siguientes

operaciones fundamentales para la elaboración y producción de papa seca:

- Selección de materia prima
- Lavado
- Cocción
- Escurrido
- Pelado
- Trozado
- Secado
- Envasado

Son las operaciones comunes que se reportan en las distintas descripciones tecnológicas de elaboración de papa seca, percibiéndose una variación considerable en las operaciones de la inhibición enzimática a través de distintas modalidades de blanqueado, para evitar el pardeamiento enzimático que afectaría el color y calidad final de la papa seca, las que pueden realizarse a través de inhibiciones químicas como es el uso del metabisulfito de sodio en solución o el tratamiento térmico o escaldado del material (en algunos casos se formulan combinados). Al respecto, debido a las controversias residuales de algunos inhibidores químicos y las susceptibilidades nocivas al consumo en el mercado, se ha considerado utilizar el tratamiento térmico o cocción de la papa, a fin de evitar el color oscuro por pardeamiento enzimático a su vez que modifica la textura de la papa, emblandeciendo y facilitando el pelado y trozado subsiguientes, considerándose un relativa desventaja el costo de energía térmica, que en la práctica artesanal se reduce con el uso de la leña y otros materiales combustibles celulósicos de cada zona.

Con respecto a los detalles de procedimiento en cada operación unitaria, también se perciben algunas diferencias, que están vinculados con las características y cantidad de procesamiento del material; por decir el pelado, que puede ser desde una operación manual a escalas menores hasta maquinizados totalmente a mayor escala con el uso de discos abrasivos e incluso agentes químicos.

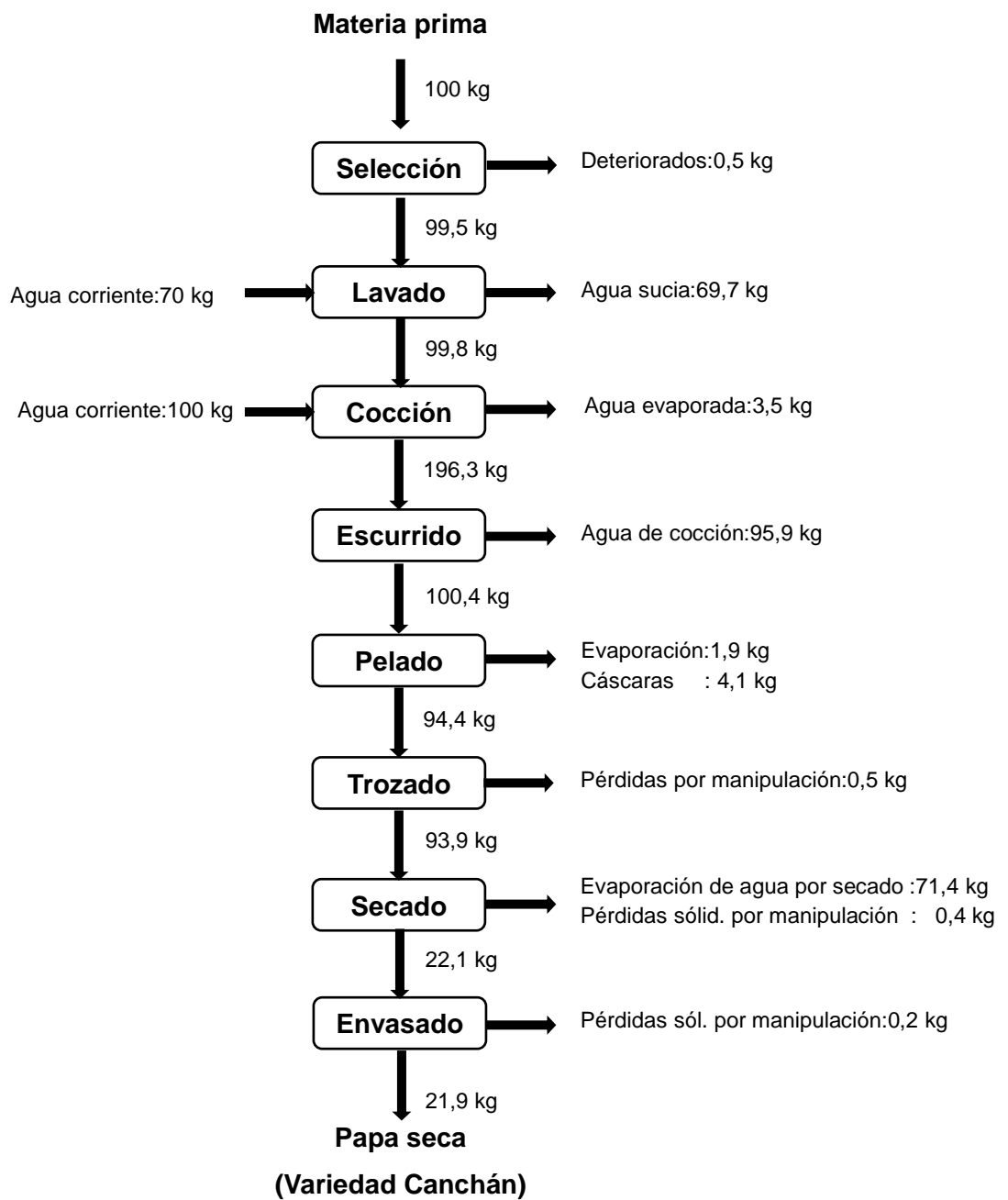
La operación de secado o deshidratación de la papa se considera como una de las operaciones estratégicas en todo el proceso, de cuyo manejo y control depende la homogeneidad y calidad final del producto, cuyos métodos de secado varían de acuerdo a la escala de producción y las condiciones climáticas vigentes en las zonas de procesamiento, observándose las siguientes alternativas:

- Secado sobre mantas, mallas, toldos al aire libre con incidencia solar directa sobre las papas.
- Secado en carpas o cámaras tipo invernadero, con cubierta transparente para la incidencia solar y calentamiento interior donde se encuentra tendido las papas.
- Secado en cámaras utilizando el aire caliente proveniente de un calentador solar, denominado colector solar.
- Secado en cámaras de secado con bandejas, cuya fuente de calentamiento pueden ser a través de sistemas eléctricos, intercambiadores de calor con uso industrial de vapor de agua, radiación electromagnética o de inducción, que varían de acuerdo a la tecnología industrial aplicada al secador.
- Secadores continuos tipo túnel u otros, que permiten el secado industrial a gran escala.

En las siguientes Figuras 4.1 y 4.2 se expone el diagrama de bloques del proceso de elaboración y producción de papa seca desarrollada en la presente investigación para cada una de las variedades de papa evaluadas, con el registro cuantitativo medio en cada línea y operación unitaria, que expresa el balance de materia propuesto para una base de 100 kg de materia prima procesada, de acuerdo a los resultados de evaluación experimental desarrollados para cada etapa del proceso de producción de papa seca.

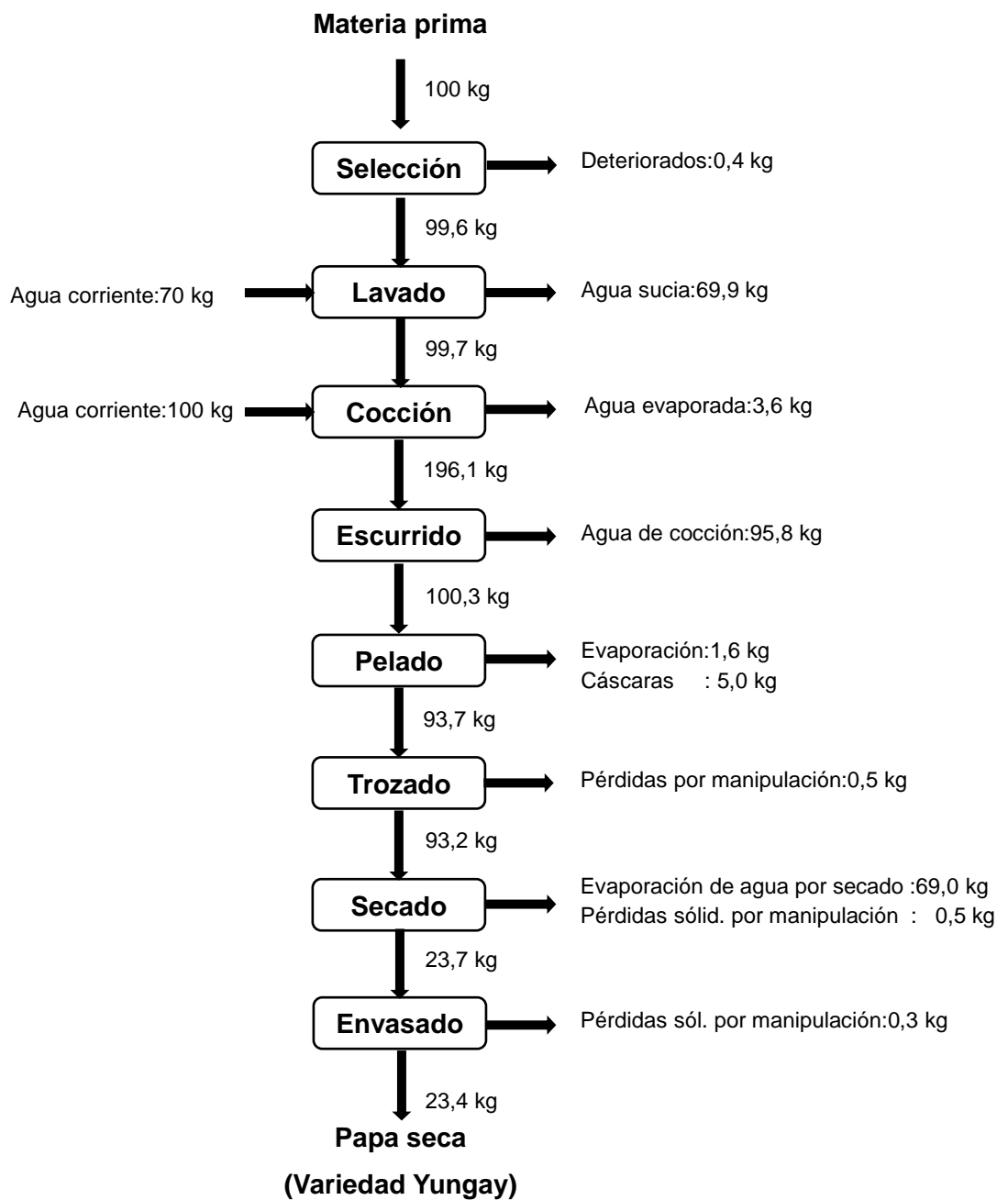
De los resultados cuantitativos del proceso, se puede concluir que el rendimiento de producción de la papa seca es del **21,9 %** (relación de papa fresca a producto seco: 4,6 : 1) **para la variedad Canchán**; y del **23,4 %** (relación de papa fresca a producto seco: 4,3 : 1) **para la variedad Yungay**, pudiendo variar un poco de acuerdo a las características iniciales de la materia prima. De acuerdo a la revisión bibliográfica, Aguilar (2012) menciona rendimientos promedios de 20 % papa seca a partir de papa fresca procesada, mientras que Almada (2005) expresa rendimientos de 15 a 25 % de papa seca, resultados compatibles con los valores reportados en la investigación.

Seguidamente se realiza una descripción tecnológica y operacional breve de cada operación unitaria realizada en las pruebas experimentales, complementadas con las observaciones reportadas en la ejecución de cada operación.



**Figura 4.1** Diagrama del proceso de producción de la papa seca, para la variedad Canchán.

**Rendimiento :** 21,9 kg de papa seca / 100 kg de papa fresca  
21,9 %  
(1 : 4,6 en peso/peso)



**Figura 4.2** Diagrama del proceso de producción de la papa seca, para la variedad Yungay.

**Rendimiento :** 23,4 kg de papa seca / 100 kg de papa fresca  
 23,4 %  
 (1 : 4,3 en peso/peso)

**Selección:**

La materia prima adquirida de los productores o en los mercados mayoristas, se encuentran normalmente distribuidas en sacos, de capacidades de 50 a 70 kg en promedio, que en algunos casos son previamente sometidos a un lavado básico, limpieza y selección; sin embargo, al recibirse la materia prima en la planta de proceso, éstos pueden alcanzar unos 0,5 % de impurezas o rechazos debido a algunas unidades deterioradas, no aptas para el proceso de elaboración de papa seca.

**Lavado:**

Se realiza con agua corriente, con la finalidad de eliminar principalmente impregnaciones superficiales de la tierra de cultivo, se sumerge en agua por un corto tiempo y luego con un cepillo suave se procede a la limpieza periférica con un enjuague final. En el lavado la papa fresca pierde las tierras adheridas en su superficie al mismo tiempo que gana la película de agua que moja toda su periferia.

**Cocción:**

La papa lavada se deposita en contenedores u ollas para el proceso de cocción o sancochado por cargas, se carga agua corriente en una proporción equivalente al volumen de papa fresca. Dependiendo del sistema de calentamiento, la carga térmica del mismo y la capacidad del contenedor se puede desarrollar la etapa de calentamiento de la carga por unos 20 a 30 minutos, luego se percibe la ebullición lenta para el escaldado y cocción suave de los tubérculos por unos 40 a 50 minutos, tiempo en la cual varía la textura de la papa, emblandeciendo (sin que sobrepase a niveles de soltarse o hacerse tipo puré las papas) y adquiriendo un ligero tono amarillento, facilitando la posterior operación del pelado de la cáscara, así como el efecto más importante que es la inhibición del pardeamiento enzimático de la papa. Durante la cocción se puede evaporar unos 3,5 % del agua de carga, y que puede variar de acuerdo a la intensidad de carga térmica y el cierre del contenedor durante la cocción; en la localidad se puede apreciar una temperatura cercana a los 92 °C en la carga a ebullición, debido a la presión local vigente.

**Escurrido:**

Concluida la cocción, la carga se vacía sobre una malla rígida con la finalidad de escurrir o filtrar el agua de cocción y separar las papas cocidas, que son relativamente blandas, con una humedad algo mayor que la papa fresca utilizada debido a la saturación de la matriz sólida durante la cocción; las papas cocidas inmediatamente se trasvasan a la mesa de trabajo para proceder con el pelado en caliente.

**Pelado:**

Las papas cocidas y en caliente facilitan el retiro manual de las cáscaras, que se deben realizar sin extraer la pulpa, se pueden utilizarse algunos instrumentos como cuchillas, cucharillas u otros metales a manera de uñas para facilitar el retiro de las cáscaras. Las cáscaras retiradas alcanzan entre unos 4 a 5 % en peso las papas cocidas, que constituyen un sub producto de relativo valor nutricional y fibras que alternativamente se suministran a los criaderos de cerdos o que podrían secarse para usarlos como ingrediente en otros procesos de producción de alimentos balanceados. Durante el pelado se observa una ligera evaporación de agua desde la superficie de las papas calientes, que alcanzan entre unos 1,5 a 2 % en peso de la papa cocida.

**Trozado:**

Cuando se dispone de la papa pelada y relativamente caliente, se hace fácil la operación de trozado utilizando una malla metálica de 1/4" de abertura o de luz, que se consigue presionando la papa ya pelada sobre el tamiz colocada sobre un recipiente, dentro del cual van acumulándose los trozos de papa con sección cuadrada y largas de acuerdo a su dimensión unitaria. Durante el trozado mecánico se perciben ciertas adherencias hacia la malla, tablero de trabajo y demás materiales de trabajo, con un nivel de pérdidas de unos 0,5 % en peso con respecto a las papas peladas.

**Secado:**

Las papas trozadas, relativamente flexibles y frágiles, se colocan y distribuyen uniformemente sobre las bandejas de secado que también son de tipo malla, para facilitar el secado tanto por la superficie superior e inferior del lecho de papas húmedas al interior de la cámara de secado del secador solar indirecto;



el secado del material se obtiene por el contacto adiabático entre el aire caliente que proviene del colector solar y se inyecta por la parte inferior de la cámara de secado, ascendiendo lentamente a través de las bandejas y permitiendo el secado gradual de la carga sólida; el aire húmedo se retira lentamente por el tope superior de la chimenea de la cámara de secado, evitándose la saturación interna del aire que interrumpiría la dinámica del secado. También se han realizado pruebas de secado paralelo utilizando las cámaras de secado eléctrico a nivel de laboratorio para las papas trozadas del proceso descrito, obteniéndose resultados similares en el producto final, obviamente los parámetros y curvas de secado varían por la naturaleza del equipo de secado. Al final se obtiene como producto la papa seca con un contenido de humedad final comprendido entre unos 8 a 9 % en peso para ambas variedades evaluadas; además, se reportan también algunas pérdidas en forma de pequeñas partículas de papa seca generadas en el trozado, adherencias en las bandejas de secado y manipulación de carga y descarga en el secador, que van por el orden de los 2 % en peso con respecto a la papa seca que debería obtenerse. Los detalles operativos del secador solar se tratarán posteriormente.

#### **Envasado:**

La papa seca que se retira de las bandejas de la cámara del secador tiene aspecto de tiras secas y algo retorcidas, con un tono de color relativamente amarillento de acuerdo a la variedad de la papa fresca utilizada y el efecto del escaldado térmico y la cocción; los trozos de papa seca son de considerable dureza, fracturables bajo cierta presión mecánica aplicada en la sección transversal, las que deberán ser envasados para preservar su humedad final y características físicas, así como evitar la contaminación por exposición abierta debido al polvo ambiental, vertido de líquidos y contaminantes en el transporte y comercialización, concurrencia de insectos y otros agentes externos. Se han ensayado envases en 1 kg y 5 kg de capacidad, para el caso de expendio a granel, igualmente se recomienda envasar en costales con bolsa plástica interna para el sellado por termofusión.

El producto seco y envasado debe ser almacenado tanto en planta, en los canales de comercialización y centros de expendio y comercialización de manera apropiada, en ambientes secos y sin concurrencia de insectos ni roedores que vulneren los productos, igualmente no es recomendable la

exposición directa al sol y sin que los envases puedan sufrir rupturas por manipulación. El tiempo de conservación y duración de la papa seca es relativamente alta, alcanzando inclusive hasta más del año.

#### 4.1.4 Requerimientos de energía térmica del proceso

En un contexto de la ingeniería básica del proyecto, es necesario estimar los aspectos y requerimientos de la energía térmica para el proceso de elaboración y producción de papa seca propuesta; de las operaciones descritas en el proceso de las Figuras 4.1 y 4.2 se identifican las siguientes operaciones que demandan la concurrencia de energía térmica:

- **Cocción:** para el calentamiento y efecto de vaporización
- **Secado:** para la eliminación del agua en la deshidratación de la papa

Los cálculos se han de realizar para la base de procesamiento de 100 kg de materia prima propuesto en ambas variedades; además, dado que no existe una variación significativa en el balance de materia desarrollado entre la variedad Canchán y Yungay, se efectuarán a continuación los requerimientos de energía térmica para las operaciones identificadas teniendo como referencia el caso de la producción de papa seca de la variedad Canchán (Figura 4.1).

#### Energía térmica para la cocción:

Primero determinamos la energía térmica neta requerida para el calentamiento de la carga de 99,8 kg de papa lavada y 100 kg de agua corriente hasta la temperatura de ebullición y el calor requerido para la evaporación del agua durante el tiempo de cocción de las papas, expresado con la siguiente ecuación:

$$Q_{nc} = [m_p C_{p_p} (T_{eb} - T_{0p}) + m_w C_{p_w} (T_{eb} - T_{0w})] + m_{ev} \lambda_w$$

Donde:

$Q_{nc}$	Calor neto para la cocción de la papa
$m_p = 99,8 \text{ kg}$	Papa lavada
$m_w = 100 \text{ kg}$	Agua corriente cargado para la cocción
$C_{p_p} = 0,84 \text{ kcal/kg.}^\circ\text{C}$	Calor específico de la papa fresca (lavada)
$C_{p_w} = 1,0 \text{ kcal/kg.}^\circ\text{C}$	Calor específico del agua líquida
$T_{0p} \approx T_{0w} = 18 \text{ }^\circ\text{C}$	Temperatura inicial del agua/para fresca
$T_{eb} \approx 92 \text{ }^\circ\text{C}$	Temperatura de ebullición del agua en la localidad
$m_{ev} = 3,5 \text{ kg}$	Agua evaporada durante la cocción

$$\lambda_w = 545 \text{ kcal/kg}$$

Calor latente de vaporización del agua a  $T_{eb}$

El agua pura, a la presión local de 548 mmHg (Ayacucho) hierve a 91,1 °C, sin embargo el agua corriente que contiene algunas sales y solubles además de la carga de papa fresca, varía su punto de ebullición, reportándose en el contenedor de cocción cerrado y para fines de los cálculos el valor de 92 °C; por otro lado, de acuerdo a las publicaciones de Reidy (1986) el calor específico de la papa fresca (con un 75 % de humedad) tiene un calor específico de 3,517 kJ/kg.K que equivale a 0,84 kcal/kg.°C. Reemplazando los datos se tiene:

$$Q_{nc} = 15\,511 \text{ kcal} = 64\,898 \text{ kJ}$$

En los procesos de cocción por carga en contenedores u ollas, utilizando mayormente en las zonas productoras leña, se estima una eficiencia de transferencia de calor de un 35 %, con la cual se requiere una energía calorífica de unos 44 317 kcal, que demanda de unos 11 kg de leña seca.

#### **Energía térmica para el secado:**

El calor neto que requiere la carga de sólidos de papa húmeda para reducir su humedad inicial desde el 78,2 % hasta el 9,0 % en peso (base húmeda), utilizando aire caliente a unos 45 °C, tal como puede manejarse en un secador solar, con los siguientes datos de entrada, cálculos de balance de materia aplicados con las ecuaciones 2.6 y 2.7, aplicados en la ecuación 2.8 del calor neto requerido para el secado dan el siguiente resultado:

#### **Datos iniciales:**

$F = 93,9 \text{ kg}$	Carga sólida que ingresa a la cámara de secado
$\%h_F = 78,2 \%$	Porcentaje de humedad inicial de la carga sólida
$\%h_W = 9,0 \%$	Porcentaje de humedad final de la papa seca
$T_F = 25 \text{ °C}$	Temperatura inicial del sólido cargado a la cámara
$T_W = 38 \text{ °C}$	Temperatura final de descarga del sólido
$T_g = 45 \text{ °C}$	Temperatura del gas de secado en la cámara
$P = 548 \text{ mmHg}$	Presión local en la ciudad de Ayacucho

#### **Balance de materia:**

$x_F = 0,782$	Fracción de la humedad inicial del sólido (78,2 %)
$x_W = 0,090$	Fracción de la humedad final del sólido (9 %)

$X_F = 3,587$	Humedad absoluta inicial del sólido (kg <sub>w</sub> /kg <sub>s</sub> )
$X_W = 0,099$	Humedad absoluta final del sólido (kg <sub>w</sub> /kg <sub>s</sub> )
$S_p = 20,47$ kg	Sólido portante o matriz seca
$W = 22,5$ kg	Sólido seco total obtenido (22,1 kg + 0,4 kg en pérdidas)
$V = 71,4$ kg	Líquido eliminado como vapor durante el secado

### Características y propiedades del agua-aire y de la matriz sólida de papa

$T_{IS} = 36,5$ °C	Temperatura de la interface sólido gas
$C_{pS} = 0,27$ kcal/kg.°C	Calor específico de la matriz sólida
$C_{pw} = 1,0$ kcal/kg.°C	Calor específico del agua líquida
$C_{pv} = 0,46$ kcal/kg.°C	Calor específico del vapor de agua
$\lambda_w = 584$ kcal/kg	Calor latente de vaporización del agua en interface

Debe recordarse que la humedad absoluta del sólido es  $X = x/(1 - x)$ , que se calcula a partir de la fracción másica unitaria; el sólido portante o la cantidad de matriz sólida presente en el sólido húmedo es  $S_p = F(1 - x_F)$ ; para el gas caliente que circula suavemente por la cámara de secado a 45 °C, con una humedad relativa del 60 % a la presión local (548 mmHg) del diagrama psicrométrico se tiene que la temperatura de saturación adiabática es de 36,5 °C, luego la temperatura predominante en la interface sólido gas durante el secado antecrítico es de  $T_{IS} \approx T_{sa} = 36,5$  °C; los valores de temperatura del sólido y las propiedades del calor específico del agua, vapor de agua y el calor latente se obtienen de Tablas de propiedades, igualmente las ecuaciones de balance de materia y energía térmica están referidas en las operaciones unitarias de secado de diversos textos (Mc Cabe, 2002; Arias, 2011). Reemplazando los datos en la ec. (2.8a), se obtiene:

$$Q_1 = 71,85 \text{ kcal}$$

$$Q_2 = 844,44 \text{ kcal}$$

$$Q_3 = 41700,68 \text{ kcal}$$

$$Q_4 = 3,04 \text{ kcal}$$

$$Q_5 = 279,19 \text{ kcal}$$

$$Q_{ns} = 42 \text{ 899,20 kcal} = 179 \text{ 490 kJ}$$

Indiscutiblemente la mayor cantidad de energía térmica requerida en el secado de las papas trozadas es la energía requerida para provocar la evaporación del

agua contenida en el material húmedo, que representa el 97,2 % del total de energía neta requerida para el secado del material. Con respecto a los rendimientos térmicos alrededor de la cámara de secado, varían de acuerdo a las condiciones constructivas y el manejo del gas de secado, pudiendo variar entre unos 30 a 60 %, con lo cual la energía disponible o real para el secado de los trozos de papa incrementará.

El calor neto requerido en la operación del secado es 2,8 veces mayor que el requerido en la operación de la cocción de la papa; luego, en un proyecto de evaluación económica deberá considerar la relevancia de la fuente de energía térmica; sede ya, la energía térmica del secado adquiere un gran ahorro cuando la fuente es la energía solar a través del colector.

## **4.2 DESCRIPCIÓN DEL SECADOR SOLAR INDIRECTO**

Con la finalidad de cumplir con el objetivo de la investigación, será conveniente describir de manera detallada el secador solar de tipo indirecto utilizada para el presente trabajo de investigación, tanto en sus aspectos estructurales constructivos, dimensionales así como sus aspectos operativos, a fin que nos permita evaluar el secado y rendimiento de la producción de la papa seca, con énfasis en la operación unitaria de secado de los trozos húmedos de papa seca con el aire caliente proveniente del colector solar, a través de un secado adiabático desarrollado en una cámara de secado cerrado con apertura superior en la chimenea para purgar el aire húmedo.

### **4.2.1 Referentes de secadores solares indirectos**

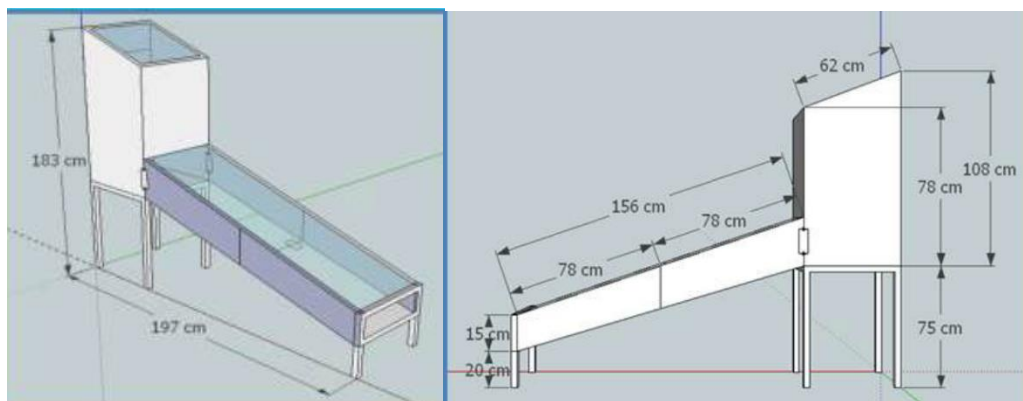
Existen diversas publicaciones sobre secadores solares indirectos que han servido de referencia para el trabajo de investigación; se identifican dos componentes principales para el equipo:

- 1) El colector solar, captador solar plano o panel solar térmico y
- 2) La cámara, cabina o compartimiento de secado

El **colector solar plano** permite aprovechar la energía de la radiación solar, transformándola en energía térmica de baja temperatura para usos domésticos o comerciales, el colector plano protegido es más favorable, constituido por una caja rectangular, cuyas dimensiones varían entre los 0,80 a 1,20 m de ancho, por unos 1,50 a 2,00 m de largo, con una altura o ancho de caja de unos 5 a 10 cm, en la cual la superficie superior está cubierta de vidrio resistente, y al

interior y fondo de la caja se ubica la placa metálica pintada de negro para absorber la radiación solar que traspasa el vidrio y convertirlo en calor. La caja rectangular del colector solar se instala inclinado para la incidencia normal o perpendicular de los rayos solares sobre la placa de vidrio, pudiendo captar en el mejor de los casos hasta el 80 % de la energía recibida del sol, para colectores con un buen diseño y aislamiento térmico (Cabrera, 2011).

En la publicación de Vidal (2012) sobre ***Diseño y construcción de un secador solar portátil*** se utiliza el secador solar indirecto para secar frutas, granos, carnes o pescado, con capacidad de extensión a diversos productos agropecuarios, proponiendo un secador solar tipo mixto con circulación natural de dimensiones indicadas en la siguiente Figura 4.3, en la cual destacan los siguientes componentes:

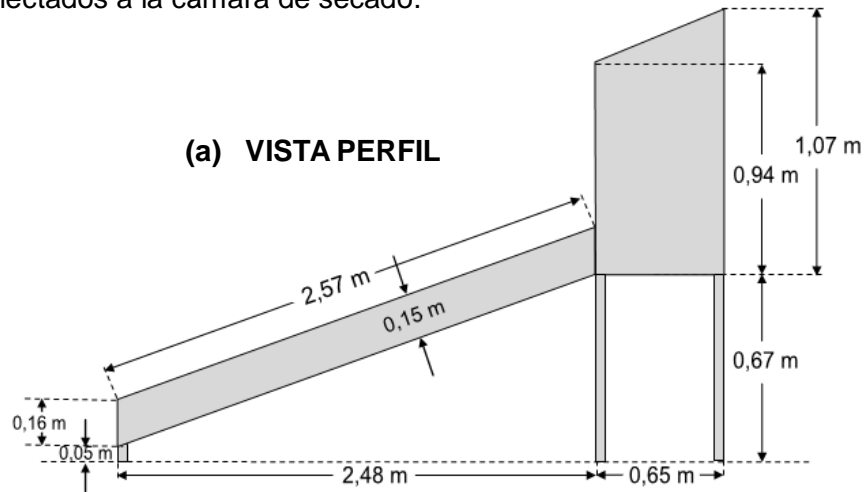


**Figura 4.3** Dimensionamiento de un secador solar prototipo propuesto por Vidal (2012).

- **Colector solar:** con panel rectangular de 1,56 m de largo por 0,54 m de ancho, con una altura de cajón de 15 cm, con una cubierta superior de vidrio de 5 mm para permitir el paso de la radiación solar hacia el cajón interno del colector, con el colector metálico galvanizado aislado con fibra de vidrio para disminuir las pérdidas de calor. El aire ambiental asciende longitudinalmente por el cajón interno del colector mientras se va calentando.
- **Cámara de secado:** interconectado al colector solar, desde la cual se provee el aire caliente; soportada sobre una estructura metálica de ángulos de 1/8" x 1/4", con una cámara de sección cuadrada de 0,54 m de lado, con una altura frontal de 0,78 cm y posterior de 1,08 m, en la cual se disponen las bandejas o charolas tipo rejilla para el secado de materiales.

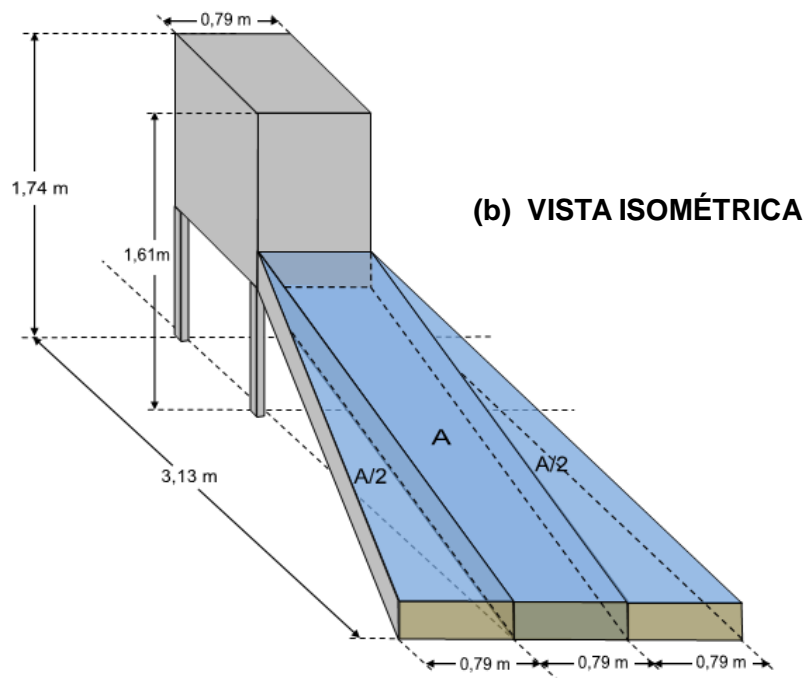
#### 4.2.2 Descripción dimensional del secador solar indirecto

Para el presenta trabajo de investigación se ha utilizado un secador solar indirecto prototipo que consta de dos tipos de colectores de la fig. 4.4 conectados a la cámara de secado.



Las características del colector son los siguientes:

- **Colector solar plano:** 0,79 m de ancho por 2,57 m de largo y con una altura de cajón de 15 cm, con ángulo de inclinación del secador solar indirecto de  $14,04^\circ$ , orientado hacia el norte.
- **Cámara de secado:** con una sección de 0,79 m por 0,65 m, por 0,94 m de altura frontal y 1,07 m de altura posterior, instalado sobre una estructura a 0,67 m de altura con respecto al nivel de piso.



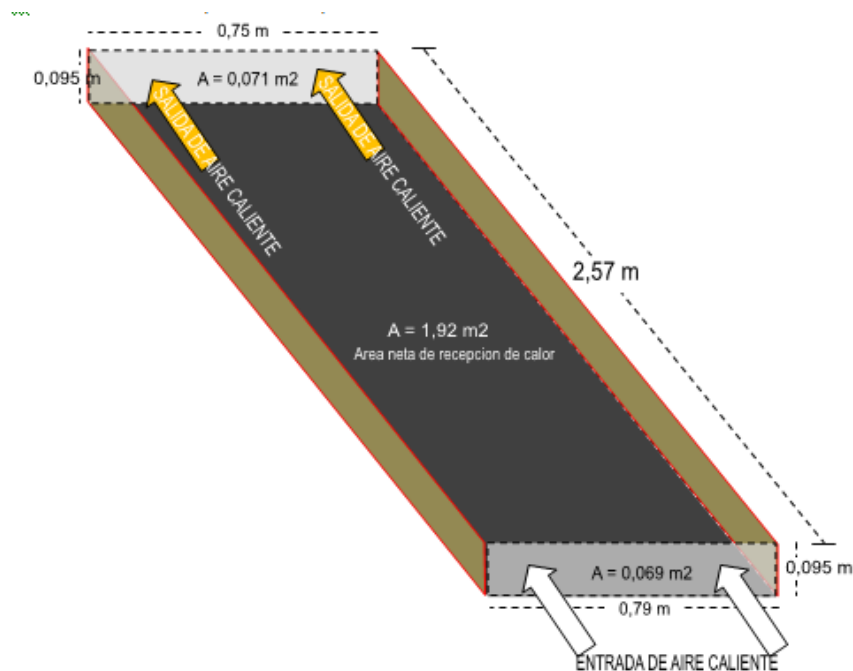
**Figura 4.4** Descripción dimensional del secador solar prototipo usado para la investigación. (a) Vista perfil. (b) Vista isométrica.

### 4.2.3 Características del colector solar plano

El colector solar plano básico, denominado CS1, representado en la Figura 4.5, posee una superficie colectora neta de  $A_{CS1}=1,92 \text{ m}^2$  pintada de negro, con aperturas netas o ventana de entrada de aire ambiental por el extremo inferior, la ventana de salida de aire caliente se interconecta a la cámara de secado, la ventana de paso de aire o área de flujo para el aire es de  $A_f = 0,071 \text{ m}^2$ .

Para su comprensión y posibilidades de réplica del mismo, a continuación, se anotan los materiales constructivos utilizados.

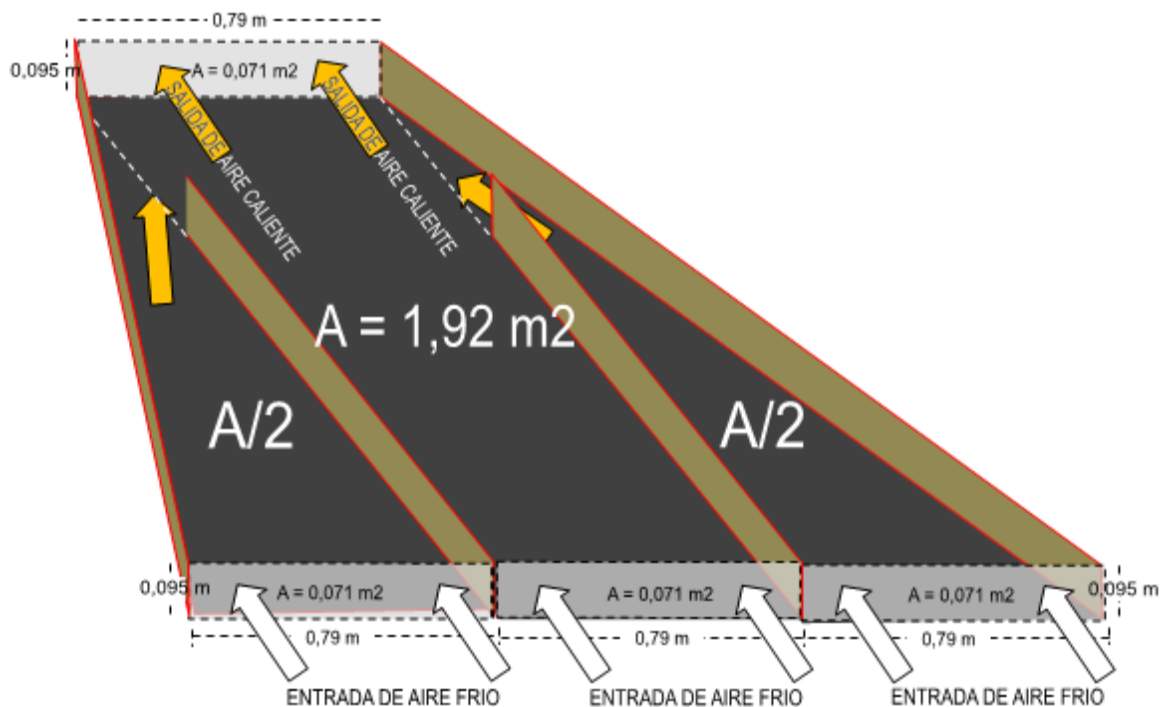
- Ángulo de fierro de 1", utilizada en la estructura del contorno del colector, para la caja de  $0,79 \text{ m} \times 2,57 \text{ m} \times 16 \text{ cm}$ .
- Planchas de triplay de 4 mm de espesor, en la base de apoyo y soporte de fondo de la caja del colector, de  $0,79 \text{ m} \times 2,57 \text{ m}$ ; igualmente en las cubiertas laterales de la caja.
- Planchas de tecnopor industrial de 1", como material aislante térmico, ubicado sobre la plancha de triplay, de  $0,79 \text{ m} \times 2,57 \text{ m}$ .
- Planchas de calamina galvanizada plana de 0,5 mm de espesor, instalada sobre el tecnopor aislante, que tiene la función de ser la placa absorbidora de la energía radiante del sol y convertir en calor; para cuyo efecto está pintado con pintura negra de alta temperatura.
- Vidrio transparente de 4 mm de espesor, que se instala en la superficie de la caja del colector, para un sistema de captación cerrada o protegida.



**Figura 4.5** Superficie colectora o recepción de energía solar instalada en el colector solar (CS1).



Con el propósito de permitir la evaluación del efecto del área del colector en el rendimiento del secado solar, el colector básico tiene adicionalmente la alternativa del colector CS2, que permite duplicar el área del colector ( $A_{CS2} = A + \frac{1}{2} A + \frac{1}{2} A = 3,84 \text{ m}^2$ ), para lo cual se adiciona de manera versátil al colector básico dos cajas de colector solar triangular, a cada lado del colector básico tipo CS1, según se ve en la Figura 4.6, el equipo utiliza una compuerta interna de conexión lateral al colector básico CS1 ubicado en el extremo superior, (véase la Figura 4.7), cuya manipulación suma el aire caliente en el modo de doble área de colector que se ha de transmitir hacia la cámara de secado.



**Figura 4.6** Incremento del área del colector solar plano, como una segunda alternativa de estudio (CS2).

Para los efectos de estudio, de la influencia de la magnitud del área del colector, es necesario entender el modo de operación, de este colector particular cuando estén integradas las tres partes, como se puede apreciar en la Figura 4.6

CS1 : Modo de operación con el panel rectangular central,  $A_{CS1} = 1,92 \text{ m}^2$ , identificado en el diagrama con el área de colector A.

CS2 : Modo de operación que adicional al panel rectangular central los paneles triangulares laterales:  $A + A/2 + A/2$ ,  $A_{CS2} = 3,84 \text{ m}^2$ .



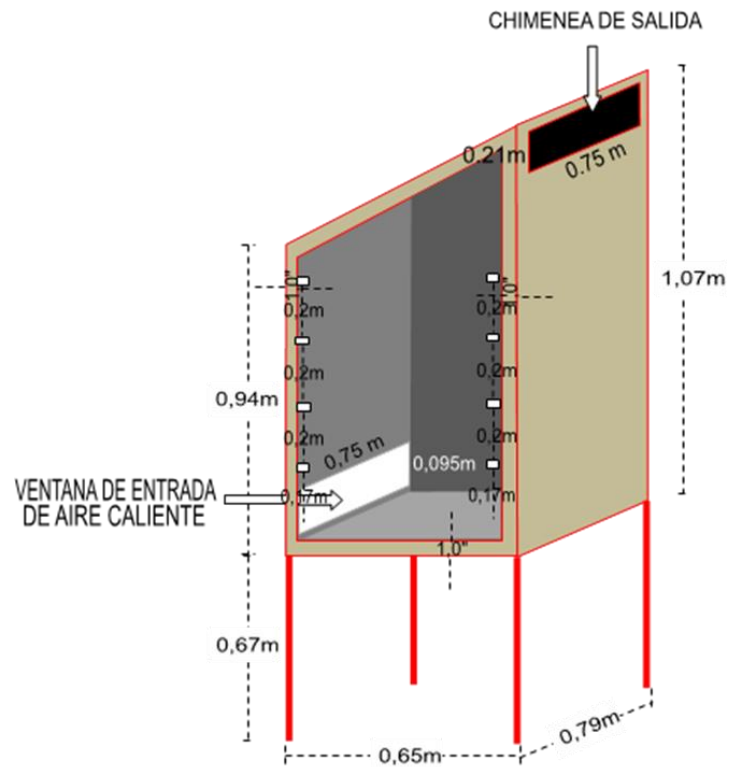
**Figura 4.7** Aspecto mecánico de la compuerta móvil que permite la conmutación del aire caliente en función al área del colector solar plano de CS1 a CS2.

#### 4.2.4 Características de la cámara de secado

El colector solar tiene la capacidad de interconectarse y suministrar el aire caliente hacia la cámara de secado; en cuyo prototipo se identifica el uso de los siguientes materiales:

- a) Ángulo de fierro de 1", en la estructura perimétrica de la cámara de secado, con parantes verticales de 1,61m en la parte frontal y de 1,74 m en la parte posterior, con un armario en la cámara de secado de 0,79 m x 0,665 m x 0,94 m en la parte frontal y 1,07 m en la parte posterior, ubicado a 0,67 m de altura con respecto al nivel de piso (ver Figura 4.8)
- b) Planchas de triplay de 4 mm de espesor, en el contorno periférico exterior del armario de la cámara de secado.
- c) Planchas de tecnopor industrial de 1" de espesor, como material aislante térmico, ubicado al interior de la plancha de triplay, configurando el armario de la cámara de secado.
- d) Cuatro pares de guías laterales, para los soportes de las bandejas metálicas que permitan introducirse en la cámara de secado, con un espaciamiento físico entre bandejas de 20 cm.

- e) Cuatro bandejas metálicas tipo malla, para portar el material húmedo en la cámara de secado.



**Figura 4.8** Dimensiones del armario de la cámara de secado interconectado al colector solar.

El equipo integrado en las partes descritas constituye el prototipo del secador solar indirecto utilizado para la investigación, las que se ven en las siguientes Figuras 4.9 y 4.10.



**Figura 4.9** Vista fotográfica lateral del secador solar indirecto con cubierta de vidrio en el colector solar.



**Figura 4.10** Vista fotográfica del secador solar indirecto mostrando detalles internos de la cámara de secado.

#### **4.2.5 Características ambientales para la operación del equipo**

Las pruebas exploratorias y definitivas de evaluación del secador solar indirecto aplicado al secado de papa se realizó entre el mes de junio a noviembre del año 2017, con una micro localización del área de trabajo en la ciudad de Ayacucho, capital de la provincia de Huamanga; aproximadamente a una Latitud de  $13^{\circ}09'31''$  S y Longitud  $74^{\circ}13'23''$  O, con una altitud de 2 746 msnm, en un ambiente libre, sin mayores concurrencias de vientos, en un periodo caracterizado por su permanente radiación solar, especialmente entre las 9 am a las 4 pm del día, con un clima agradable, templado y seco.

Las principales características ambientales reportadas y consolidadas para el periodo de estudio se presentan en la Tabla 4.3; además, SENAMHI reporta para la ciudad de Ayacucho que la más alta temperatura se alcanza en noviembre y la más baja en julio; con lluvias de mayor intensidad en enero.

El secador solar indirecto descrito se ubica con una orientación apropiada a la incidencia de los rayos solares, longitudinalmente instalado de sur a norte, con la inclinación favorable para la incidencia vertical de los rayos solares sobre la superficie del colector solar en la mayor parte del día con insolación permanente; luego se procedió al registro múltiple de datos térmicos y de humedad ambiental en el colector solar plano, en la cámara de secado, en vacío y con carga de papas trozadas húmedas distribuidas en las bandejas, con la finalidad de evaluar los diversos eventos concurrentes en el equipo, como son las variaciones de temperatura, niveles de calentamiento y la eficiencia de generación de calor útil en el colector, que nos permita evaluar su

capacidad y eficiencia de calentar aire así como las evaluaciones propiamente dichas del secado de papas en diversas condiciones definidas en el diseño de factores para la experimentación.

**Tabla 4.3** Características ambientales generales promedios asociadas a la zona de trabajo.

Característica	Magnitud
Presión local	548 mmHg
Temperatura mínima media anual	6,6 °C
Temperatura máxima media anual	25,5 °C
Temperatura media anual	15,4 °C
% humedad relativa media anual	56 %
Mayor precipitación	117,1 mm/mes (enero)
Índice de radiación UV	10 a 11 (medio día)
Promedio de brillo solar anual	67 %
Temp. media (junio a noviembre)	27 °C (en el día solar)
Periodo de radiación solar normal	Entre 8 am a 5 pm
Radiación solar aprovechable	Entre 9 am a 3 pm
Nubosidad (junio a noviembre)	Baja a nula

**Fuente:** Elaboración propia

#### 4.2.6 Operación y evaluación del colector

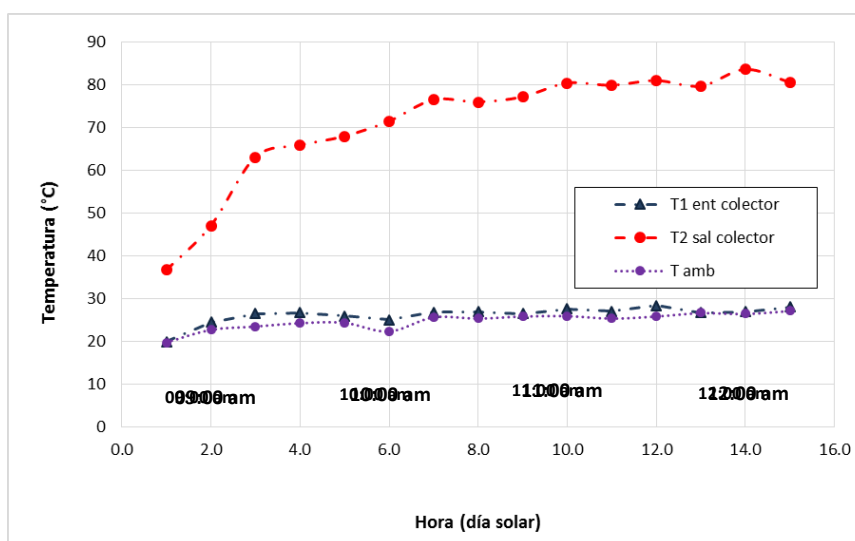
Previamente, se ha visto por conveniente establecer en la localidad, para el periodo de trabajo, una escala ponderada de cualificación del nivel de insolación disponible hacia el colector solar en función a la presencia de nubes que obstruyan el grado de incidencia solar sobre el colector solar plano, con la ponderación expuesta en la Tabla 4.4.

**Tabla 4.4** Características del brillo solar asociadas a la zona de trabajo.

Intensidad del brillo solar sobre el colector	Ponderación
Brillo solar intenso (sin nubes)	5
Brillo solar moderadamente intenso	4
Brillo solar intermedio (nubes escasas)	3
Brillo solar bajo (con nubes intermedias)	2
Brillo solar escaso difuso (nubes intensas)	1
Sin brillo solar (totalmente nublado)	0

**Fuente:** Elaboración propia

El secador solar indirecto prototipo se ha evaluado en términos medios entre las 8:00 am hasta las 4:00 pm del día, disponiéndose en gran parte de los días de experimentación un brillo solar intenso y permanente en el área de trabajo, considerándose en más del 80 % en la ponderación 5, con tendencias hacia la ponderación 4 en algunos momentos y en menor proporción a los demás valores de ponderación de menor brillo; tales que, la evaluación el colector solar plano funcionamiento en vacío (aún sin carga de material sólido en la cámara de secado) presentan curvas típicas de perfil de temperatura como las que se representan en la siguiente Figura 4.11, para el caso de evaluación de la alternativa del colector solar plano operando en el modo CS1, con el área de exposición a la radiación solar de 1,92 m<sup>2</sup>.



**Figura 4.11** Perfil de temperaturas en el funcionamiento del colector solar plano.

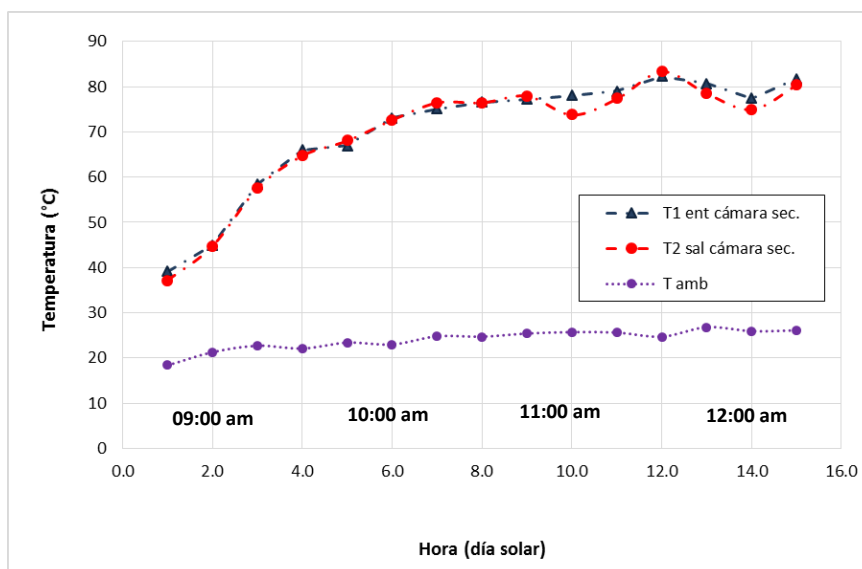
A partir de los registros experimentales, así como de los perfiles expuestos en la Figura 4.11 se pueden reportar las siguientes observaciones fundamentales:

- Cuando se da inicio al funcionamiento del colector solar, se aprecia la primera etapa transitoria de estabilización que dura aproximadamente 1 hora, luego la temperatura de salida de aire del colector se va estabilizando térmicamente, presentando una asíntota hacia la segunda etapa en régimen estacionario.
- El perfil de temperatura en el ambiente prácticamente es idéntica, al perfil de temperatura del aire que entra al colector solar plano por la ventana de carga inferior.

- La temperatura media del aire ambiental es de  $25,6\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ , mientras que del aire fresco que ingresa al colector es de  $26,9\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; valores que tienen bastante proximidad.
- El aire que se va calentando gradualmente, conforme se va estabilizando la incidencia de los rayos solares sobre el colector negro del panel y se va transformando la energía radiante en calor, a su vez que se va estabilizando el sistema térmico del sistema (pérdidas y estabilidad térmica con toda la estructura del equipo y sus alrededores), se observa el incremento de la temperatura del aire a la salida, que luego de 1 hora de funcionamiento alcanza un promedio de  $77,7\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 4,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
- Conforme el aire se va calentando en el interior del colector solar plano, se desplaza por convección natural hacia el tope superior del colector, alcanzando una velocidad media de  $0,11\text{ m/s} \pm 0,02\text{ m/s}$  a la salida del colector, cuya área de flujo para el aire caliente en la salida del colector es de  $0,071\text{ m}^2$ , generándose un incremento de temperatura en el aire de  $\Delta T_{\text{aire}}$  de hasta  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; resultado que demuestra la gran capacidad de calentamiento del aire por parte del colector solar plano.
- En el medio ambiente se registra paralelamente una humedad relativa promedio del  $55,1\text{ \%} \pm 5,5\text{ \%}$ , estado que nos indica un aire relativamente seco en la época de la experimentación, muy favorable para el secado; el aire que ingresa al secador registra un promedio del  $54,8\text{ \%} \pm 3,4\text{ \%}$ . Ocasionalmente se registra un movimiento convectivo natural del aire externo, con un promedio de  $0,25\text{ m/s} \pm 0,19\text{ m/s}$ , que ventila la superficie del vidrio y no favorece al trabajo, porque incrementa el coeficiente convectivo de transferencia de calor externo que provoca un poco de enfriamiento de la superficie del colector.

#### **4.2.7 Operación y evaluación de la cámara de secado**

Luego se ha conectado el colector solar plano hacia el armario de la cámara de secado y sin carga de sólidos o en vacío se ha procedido también a su evaluación térmica a través del registro de temperaturas, humedad relativa y velocidades del aire caliente que circula por la propia convección natural del aire caliente por el interior de la cámara, obteniéndose la evolución de la cámara de secado con perfiles de temperatura tal como se indica en la Figura 4.12.



**Figura 4.12** Perfil de temperaturas en el funcionamiento de la cámara de secado.

Con los datos experimentales de evolución de temperatura representados en la Figura 4.12 para la cámara de secado operando sin carga se puede reportar las siguientes observaciones:

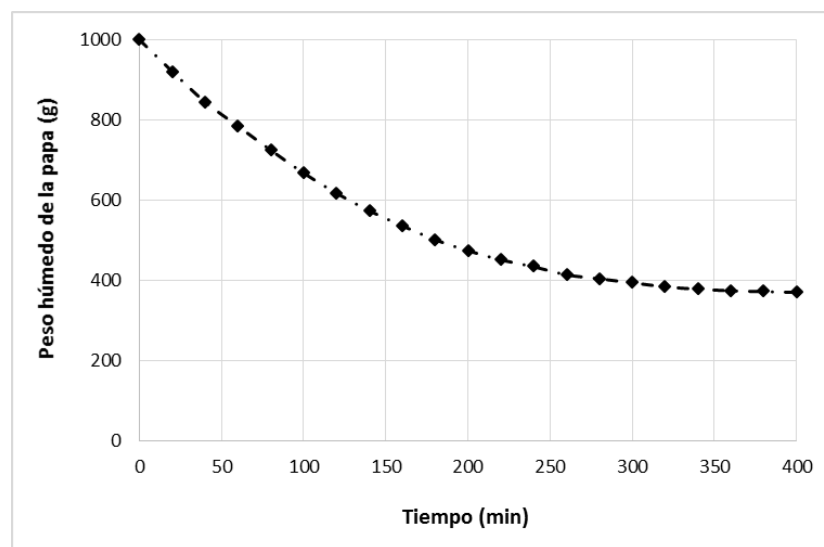
- La cabina de la cámara de secado responde de manera similar a la dinámica térmica que ocurre en el colector solar plano, percibiéndose una primera etapa transitoria de calentamiento que abarca aproximadamente una hora, luego del cual se percibe la tendencia a la estabilización térmica del ambiente interno de la cámara de secado.
- Los perfiles de temperatura de la entrada y salida en la cámara de secado prácticamente se superponen, esto indica que, no existe una diferencia significativa de temperaturas (funcionando en vacío), lo cual nos permite afirmar que el nivel de pérdidas de energía térmica del aire caliente en la cámara es insignificante, vale decir, que posee un buen sistema de aislamiento térmico.
- En el periodo de estabilidad térmica, se registra que la temperatura media que puede alcanzarse en la entrada de la cámara de secado es de los  $77,1\text{ °C} \pm 4,3\text{ °C}$ , y de  $76,4\text{ °C} \pm 4,1\text{ °C}$  en la salida, sin mayor diferencia, lo cual implica que el interior de la cámara sin carga se estabiliza a un valor medio de  $76,8\text{ °C}$  para un día con brillo solar intenso constante.
- La temperatura media del ambiente externo es de los  $25,1\text{ °C} \pm 1,1\text{ °C}$ , de manera compatible a lo observado en la evaluación del colector solar plano.
- La velocidad media del aire caliente que abandona la cámara de secado (por el tope superior posterior de la cámara) es de  $0,05\text{ m/s} \pm 0,02\text{ m/s}$  a



través de un área de flujo de 0,158 m<sup>2</sup>, y con una humedad relativa promedio en el periodo estacionario de 4,7 % ± 3,3 % a la presión local (para la prueba sin carga de sólidos húmedos), condiciones del aire caliente que implican un gran potencial para el secado.

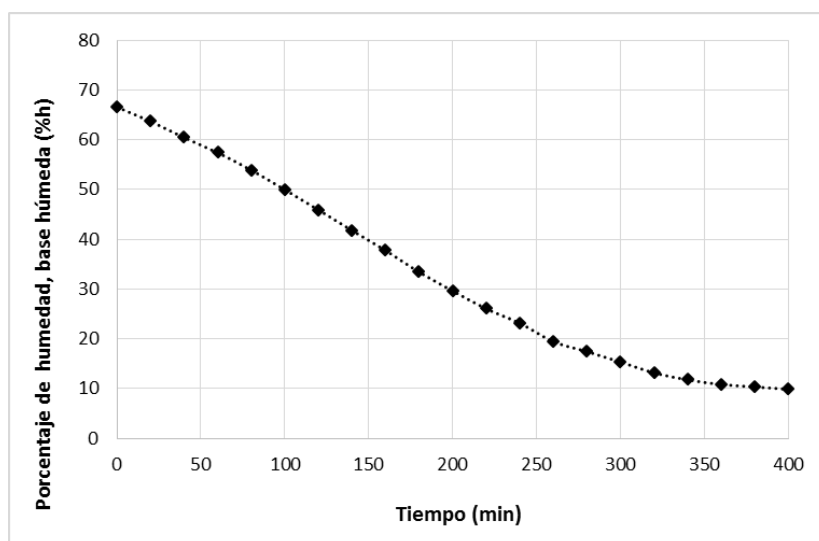
#### 4.2.8 Operación del secador solar indirecto con carga de prueba

Siguiendo el proceso de elaboración de la papa seca, de acuerdo a la secuencia de operaciones expuesta en el ítem 4.1.3, se ha realizado una prueba de operación referencial en el equipo de secado solar indirecto, para lo cual se ha dispuesto de 1 000 g de papa trozada húmeda dispuesta sobre cada bandeja en el interior de la cámara de secado y dejándose circular el aire caliente por convección natural procedente del colector solar plano, que asciende transversalmente por el lecho de trozo de papas húmedas, obteniendo el secado de las papas hasta llegar a peso constante sobre las seis horas de evaluación, conseguida en un día con brillo solar permanente; la curva experimental de disminución de peso total de la carga en el interior de la cámara de secado en función del tiempo se presenta en la Figura 4.13.



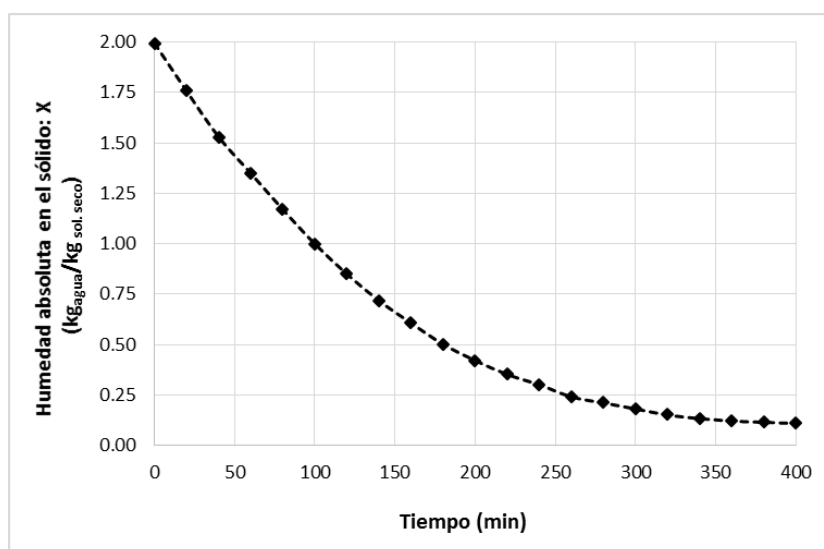
**Figura 4.13** Perfil de disminución del peso de papa húmeda durante el secado solar indirecto.

La humedad inicial de la papa cocida y trozada que ingresa a la cámara es del 66,6 % en base húmeda, reduciéndose hasta un contenido del 9,97 % de humedad final al cabo de 6 horas y 40 min de secado con el secador solar indirecto, iniciado desde las 8:30 am, siendo la curva de reducción del porcentaje de humedad experimental de la carga en el secador con el perfil expuesto en Figura 4.14.



**Figura 4.14** Perfil de disminución del % de humedad (bh) de la papa durante el secado solar indirecto.

En los estudios de secado es apropiado evaluar la disminución del contenido de humedad absoluta o en base seca del sólido durante el secado, identificado como:  $X$ , que expresa el contenido de agua en  $\text{kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{sólido seco}}$ , obteniéndose la curva experimental de humedad absoluta en función al tiempo como se indica en la Figura 4.15.

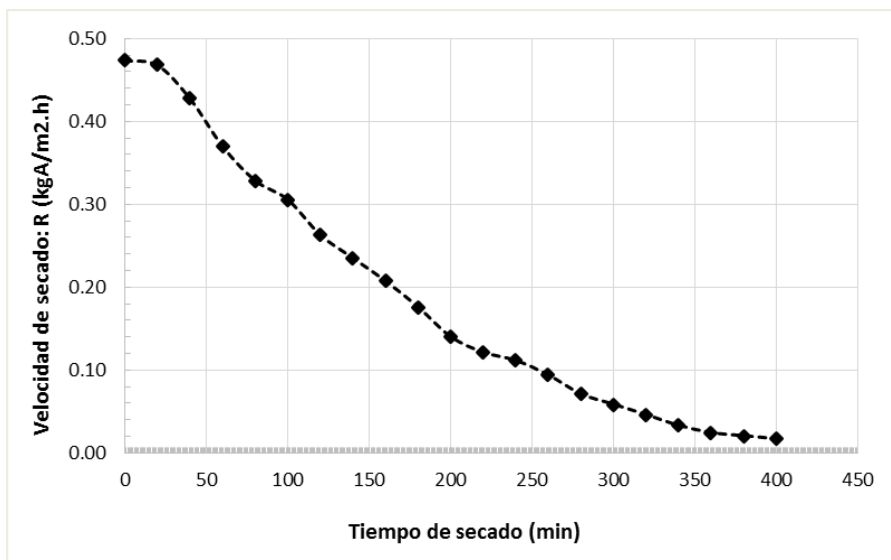


**Figura 4.15** Perfil de disminución de la humedad absoluta en la papa:  $X$  ( $\text{kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{sólido seco}}$ ) durante el secado solar indirecto.

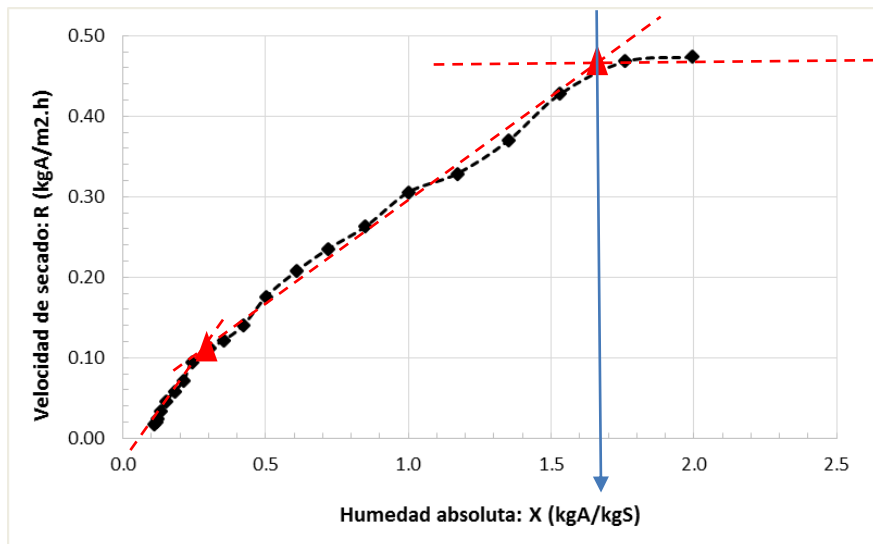
Las Figuras 4.13 al 4.15 son curvas fundamentales del secado de materiales con respecto al tiempo para el secado solar de trozos de papa, concordantes con la información bibliográfica, de las cuales se desprenden las siguientes observaciones experimentales:

- El peso húmedo de la papa seca va disminuyendo gradualmente durante el tiempo del secado solar indirecto del material, desde el periodo de acondicionamiento térmico breve al inicio, seguido por el periodo de secado a velocidad constante (que se evaluarán posteriormente), hasta sobrepasar la probable humedad crítica e ingresar en periodo de secado a velocidad decreciente, evidenciado en la Figura 4.13 por el atenuamiento asintótico del peso hacia el final; vale decir, va tendiendo al peso constante, observándose el producto seco en la bandeja de secado.
- El porcentaje de humedad de la papa cargada en la bandeja (en base húmeda o con respecto al total del material) va disminuyendo gradualmente en el tiempo de secado; que para éste caso es desde unos 67 % de humedad inicial hasta unos 10 % de humedad final, expresada en la Figura 4.14.

La velocidad de secado:  $R$ , expresado en  $\text{kg}_{\text{agua}}/\text{m}^2.\text{h}$ , que se eliminan durante el secado por cada unidad de superficie o área unitaria de secado expuesto en las bandejas, se determina sobre la base de la variación de la humedad absoluta con respecto al tiempo expuesto en la Figura 4.15, sabiendo que los 1 000 g de papa húmeda se han distribuido en una bandeja tipo malla, al 75 % de cobertura del área total de la bandeja, considerándose como área efectiva para el secado por ambos lados (superior e inferior del lecho), se tiene un área efectivo de exposición al secado de  $0,522 \text{ m}^2$ , con la cual se tiene las siguientes curvas de secado expuestas en las Figuras 4.16 y 4.17.



**Figura 4.16** Variación de la velocidad de secado en función al tiempo.



**Figura 4.17** Curva de velocidad de secado en función a la humedad absoluta en base seca.

De la Figura 4.17 se puede reportar que el punto crítico se alcanza rápidamente, a una humedad absoluta de 1,7  $\text{kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{sól seco}}$ , que equivale a decir a los 63 % de contenido de agua de la papa en base húmeda, que implicaría a afirmar que el periodo antecrítico del proceso de secado es relativamente corto, predominando el periodo postcrítico, en la cual se manifiesta como fase controlante las condiciones internas referidas a la naturaleza y estructura física de la papa.


### 4.3 EVALUACIÓN DEL SECADOR SOLAR INDIRECTO

Considerando la evaluación de prueba del secado de papa en el secador solar indirecto, se procede a realizar la evaluación y operación controlada y monitoreada del secado de cargas de papa húmeda que permitan determinar los distintos aspectos operativos y parámetros del secado desarrollado por el secador solar, con la finalidad de proseguir con la evaluación de los objetivos establecidos para la investigación.

#### 4.3.1 Factores de evaluación del secado solar indirecto

Para los propósitos de la evaluación de la operación del secado utilizando el secador solar indirecto, se han establecido las alternativas o factores de estudio indicadas en la Tabla 4.5.

**Tabla 4.5** Factores y alternativas de evaluación en la investigación del secado solar de papa.

FACTORES	ALTERNATIVAS DE EVALUACIÓN
Variedad de papa	<ul style="list-style-type: none"> <li>• V1 : Canchán</li> <li>• V2 : Yungay</li> </ul>
Convección de aire	<ul style="list-style-type: none"> <li>• CN : Natural</li> <li>• CF : Forzado (ventilador eléctrico)</li> </ul>
Área del colector solar	<ul style="list-style-type: none"> <li>• CS1 (1,92 m<sup>2</sup>)</li> <li>• CS2 (3,84 m<sup>2</sup>)</li> </ul>
Tamaño de los trozos de papa cocida para el secado	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tamaño comercial: (1x1x5 cm, Sup. unit. 22 cm<sup>2</sup>)</li> </ul> 

**Fuente:** Elaboración propia

Con respecto a la definición de las variedades de papa a evaluarse en la presente investigación, están sustentadas en el ítem 4.1.1. Los modos de convección del aire a través del sistema de secado es por convección natural (CN) en su concepción primigenia del secado solar indirecto, que canaliza el flujo ascensional del aire caliente bajo el principio básico del efecto de chimenea a través del colector y la cámara de secado debido a su cambio de densidad por incremento de temperatura; sin embargo, para una evaluación comparativa, se ha considerado incorporar la evaluación del secado por convección forzada (CF) utilizando un pequeño ventilador eléctrico impulsor de aire en la entrada del colector, en un solo nivel o grado de velocidad de ventilación.

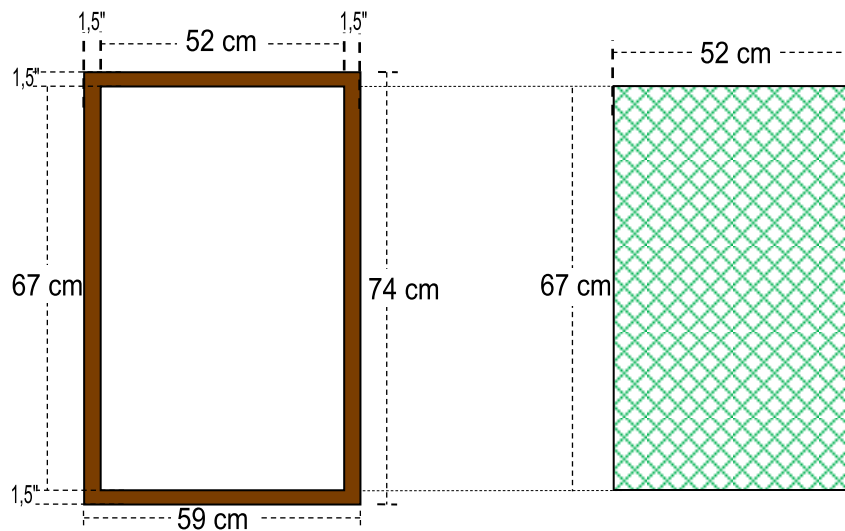
Con respecto a los modos de operación del colector solar plano, ya sea con el área neta del colector solar en el modo CS1 o duplicando el área en el modo de operación CS2 gracias a la compuerta de conmutación expresada en el ítem 4.2.4, permite evaluar el efecto del área del colector solar plano.

Con respecto a los tamaños unitarios de la papa trozada a disponerse sobre las bandejas tipo malla, se sabe que a menor tamaño de los trozos, se consigue el menor espesor resistivo de material sólido al fenómeno de secado, que influye considerablemente en el periodo de secado postcrítico, en la cual la evacuación y eliminación del líquido desde el interior de la matriz sólida se ve afectada por los mecanismos de capilaridad y difusión del agua. Sin embargo,

cabe precisar que el tamaño comercial que se expende mayormente en el mercado local corresponde a tiras de papa cocida de 1 cm x 1 cm de sección cuadrada; la forma geométrica acondicionada de la papa húmeda para el secado son el tipo paralelepípedos, conseguida por cortes por presión manual sobre la malla metálica en la luz indicada (1 cm de apertura cuadrada) aplicada sobre la papa cocida y pelada, que en caliente presenta una textura suave y manejable.

#### 4.3.2 Características de las bandejas y carga de sólidos en el secador

Es necesario expresar el detalle de las bandejas utilizadas en el experimento, ya que su naturaleza constructiva así como la forma de distribución de los trozos de papa húmeda sobre dicha bandeja, definirán el área de secado disponible como superficie de contacto del aire caliente con el lecho de sólidos dispuesto en todas las bandejas, que es un parámetro importante en la evaluación del secado.



(a)(b)

**Figura 4.18** Dimensiones de la bandeja de secado, **(a)** marco de soporte y **(b)** malla para extender las papas.

La cámara de secado tiene la posibilidad de manejar hasta 4 bandejas tipo malla a plena carga, sobre la cual se extiende y fija la malla metálica, constituida por un entretejido de alambres de flexibilidad intermedia con una luz cuadrada de 1 cm de lado (la rigidez es admisible para soportar la carga sólida), cuyas dimensiones se detallan en la Figura 4.18; cabe precisar que, el alambre del entretejido posee un recubrimiento de polímero permanente y resistente a los agentes externos agresivos sin contaminar al producto, que

evita el contacto directo del metal con el alimento, apropiado para nuestra investigación.

La disponibilidad del área de secado que se obtiene de acuerdo a la carga y distribución del material húmedo sobre las bandejas, se detallan en la Tabla 4.6, las que se aplicarán en las distintas evaluaciones; cabe mencionar que, el uso de mallas permite la circulación transversal intrapartícula del aire caliente, favoreciendo la velocidad del secado, además, técnicamente se duplicaría el área de secado del lecho de partículas, quedando expuesta al aire caliente la superficie superior del lecho así como la superficie inferior o desde la base de la malla. En la Figura 4.19 se aprecia una vista fotográfica de la bandeja tipo malla construida y utilizada como accesorios de la cámara de secado solar.



**Figura 4.19** Ubicación de la bandeja tipo malla en el interior de la cámara de secado, portando los trozos de papa.

**Tabla 4.6** Características de las bandejas utilizadas y disponibilidad del área de secado.

DETALLES DE BANDEJAS y DISPONIBILIDAD DEL ÁREA DE SECADO	
Tipo de bandejas	Malla rectangular (1 cm de luz cuadrada)
Número de bandejas: <b>N</b>	04 unidades (máximo)
Área unitaria de bandeja: <b>A<sub>u</sub></b>	0,52 m x 0,67 m = 0,348 m <sup>2</sup>
Área de secado disponible: <b>A</b>	<b>A = 2 N.A<sub>u</sub>.f<sub>c</sub></b> Donde: <b>f<sub>c</sub></b> = factor de carga de sólidos húmedos sobre las bandejas utilizadas.

**Fuente:** Elaboración propia

De acuerdo a la información de la Tabla 4.6, se afirma que si se utiliza las cuatro bandejas tipo malla ( $N = 4$ ), entendiéndose que el secado se dará por ambas caras de la malla ( $\times 2$ ), en un supuesto caso de un factor de carga de sólidos máxima o totalmente distribuida como lecho uniforme sobre la malla ( $f_c = 1$  equivalente al uso del 100 % de la superficie de bandeja) tendríamos el máximo área de secado disponible para el equipo que es  $A = 2,78 \text{ m}^2$ , valor que variará de acuerdo a la carga operativa de cada ensayo. El cálculo del valor de  $f_c = 0,75$ , se detalla en el Anexo 4, donde se obtiene el valor práctico operativo equivalente a  $f_c = 75\%$  ( $f_c = 0,75$ ) de la superficie de la bandeja para extender los trozos húmedos de papa, con la finalidad de permitir el flujo ascensional del aire caliente a través de las cuatro bandejas.

#### **4.3.3 Evaluación del secado solar indirecto de acuerdo a los factores**

Para la evaluación del secado solar de la papa, se procesaron aproximadamente unos 5 kg de materia prima por cada tipo de evaluación, procediéndose con las operaciones descritas en el proceso de elaboración descrito en el ítem 4.1.3, luego del respectivo trozado de las papas cocidas (para ambas variedades y de acuerdo a cada tipo de evaluación) se habilitan 4,0 kg de papa húmeda trozada y se procede a distribuir de manera uniforme sobre las bandejas tipo malla para incorporarlo a la cámara de secado, previamente calentada con el aire caliente circulante desde el colector solar plano, para los fines de la evaluación de la dinámica del secado; el secado solar en los diversos casos evaluados se ha conseguido dentro del periodo del día solar, de seis horas de secado en todos los casos (entre las 09:00 am hasta las 03:00pm), previa estabilización térmica del equipo de aproximadamente en una hora, sin que haya existido la necesidad de interrumpir el secado solar del día para proseguir en el día siguiente.

En los ensayos de secado solar se determina la humedad de la papa, se controla de manera relevante la variación del peso de la papa en función al transcurso del tiempo de secado, paralelamente se realiza el control de la temperatura del aire caliente en el circuito del colector solar plano y la cámara de secado, del mismo modo se controla la humedad relativa y la velocidad del aire que circula a través del secador solar indirecto.

El diseño experimental formulado de acuerdo a las variables y factores definidos en la Tabla 4.7, que delinearán el número de los diferentes experimentos del secado de papa.



**Tabla 4.7** Diseño experimental del secado solar de papa de acuerdo a variables y factores.

Colector solar utilizado	Tipo de Convección	Variedad de papa	Código Experimento
CS1 : Colector solar 01	CN : Convección Natural	V1: Canchán	E01
		V2: Yungay	E02
	CF : Convección Forzada	V1	E03
		V2	E04
CS2 : Colector solar 02	CN	V1	E05
		V2	E06
	CF	V1	E07
		V2	E08

**Fuente:** Elaboración propia

Las principales características del equipo de secado solar indirecto utilizado para el estudio, así como los valores de la cantidad de papa húmeda y los parámetros de carga en el secador solar se presentan en la siguiente Tabla 4.8:

**Tabla 4.8** Características principales del equipo y la papa húmeda en trozos sometida al secado solar indirecto.

Característica	Símbolo	Unid	Valor
Área del colector solar 01: CS1	$A_{CS1}$	m <sup>2</sup>	1,92
Área del colector solar 02: CS2	$A_{CS2}$	m <sup>2</sup>	3,84
% humedad papa húmeda Canchán	%hum <sub>v1</sub>	% (bh)	77,1±2,5
% humedad papa húmeda Yungay	%hum <sub>v2</sub>	% (bh)	78,2±2,4

(\*) Valores usados por igual en cada ensayo experimental

**Fuente:** Elaboración propia

A continuación, se presentan los resultados experimentales obtenidos para los distintos ensayos realizados en el secador solar indirecto de acuerdo al diseño indicado en la Tabla 4.7.

Donde:

% hum	Porcentaje de humedad, base húmeda, del sólido
$T_{amb}$	Temperatura del ambiente.
$T_{aire\ col}$	Temperatura del aire calentado por el colector solar
$T_{aire\ sec}$	Temperatura del aire húmedo a la salida de la cámara de secado
%H <sub>rel</sub>	Porcentaje de humedad relativa del aire húmedo a la salida de la Cámara de secado

**Tabla 4.9** Evaluación del secado solar indirecto (CS1) de papa Canchán, por convección natural (E01)

Código del ensayo		E01: V1,CN,CS1	% hum inicial			77,1 %
Variedad de papa		Canchán	% hum final			10,2 %
Tipo de convección		Natural	Velocidad media aire			- -
Colector solar		CS1	Tiempo de secado total			7 h y 45 min
Hora del ensayo	Tiempo (h)	Peso (g)	T <sub>amb</sub> (°C)	T <sub>aire col</sub> (°C)	T <sub>aire sec</sub> (°C)	%H <sub>rel</sub>
09:00 am	0	4000	18,2	44,4	42,3	15
10:00 am	1	3715	22,3	54,3	36,7	35
11:00 am	2	2652	24,2	58,0	35,0	40
12:00 am	3	2070	28,2	60,4	35,9	35
01:00 pm	4	1716	29,8	61,2	40,0	32
02:00 pm	5	1430	28,1	58,5	36,1	30
03:00 pm	6	1228	26,5	56,5	34,0	27
04:00 pm	7	1093	28,1	54,5	35,2	28
04:45 pm	7.75	1020	23,6	52,0	38,1	21

Elaboración propia

**Tabla 4.10** Evaluación del secado solar indirecto (CS1) de papa Yungay, por convección natural (E02)

Código del ensayo		E02: V2,CN,CS1	% hum inicial			78,2 %
Variedad de papa		Yungay	% hum final			11,5 %
Tipo de convección		Natural	Velocidad media aire			- -
Colector solar		CS1	Tiempo de secado total			7 h y 30 min
Hora del ensayo	Tiempo (h)	Peso (g)	T <sub>amb</sub> (°C)	T <sub>aire col</sub> (°C)	T <sub>aire sec</sub> (°C)	%H <sub>rel</sub>
09:00 am	0	4000	17,3	42,8	36,7	16
10:00 am	1	3764	19,2	49,9	38,5	32
11:00 am	2	2796	23,1	55,3	40,2	38
12:00 am	3	2217	25,4	62,4	41,1	33
01:00 pm	4	1705	27,8	46,8	34,2	31
02:00 pm	5	1450	25,7	45,0	32,8	28
03:00 pm	6	1185	23,4	44,7	33,2	25
04:00 pm	7	1042	21,1	45,2	31,7	21
04:30 pm	7.5	985	22,9	43,0	36,7	17

Elaboración propia

**Tabla 4.11** Evaluación del secado solar indirecto (CS1) de papa Canchán, por convección forzada (E03)

Código del ensayo		E03:V1,CF,CS1	% hum inicial			77,1 %
Variedad de papa		Canchán	% hum final			11,5 %
Tipo de convección		Forzada	Velocidad media aire			1,1 m/s
Colector solar		CS1	Tiempo de secado total			6 h y 15 min
Hora del ensayo	Tiempo (h)	Peso (g)	T <sub>amb</sub> (°C)	T <sub>aire col</sub> (°C)	T <sub>aire sec</sub> (°C)	%H <sub>rel</sub>
09:00 am	0	4000	17,5	39,4	32,7	17
10:00 am	1	2872	21,8	49,7	35,1	32
11:00 am	2	2136	23,4	56,8	41,2	31
12:00 am	3	1658	25,1	61,2	45,7	26
01:00 pm	4	1358	27,8	42,6	37,8	22
02:00 pm	5	1105	26,1	36,7	31,8	18
03:00 pm	6	1028	25,8	35,9	29,5	17
03:15 pm	6.25	1007	25,4	32,7	28,0	16

Elaboración propia

**Tabla 4.12** Evaluación del secado solar indirecto (CS1) de papa Yungay, por convección forzada (E04)

Código del ensayo		E04 : V2,CF,CS1	% hum inicial			78,2 %
Variedad de papa		Yungay	% hum final			9,4 %
Tipo de convección		Forzada	Velocidad media aire			1,1 m/s
Colector solar		CS1	Tiempo de secado total			6 h y 30 min
Hora del ensayo	Tiempo (h)	Peso (g)	T <sub>amb</sub> (°C)	T <sub>aire col</sub> (°C)	T <sub>aire sec</sub> (°C)	%H <sub>rel</sub>
09:00 am	0	4000	17,5	38,7	27,5	14
10:00 am	1	2915	21,8	47,3	37,6	28
11:00 am	2	2311	23,4	59,1	41,7	25
12:00 am	3	1678	25,1	66,4	39,4	21
01:00 pm	4	1345	27,8	49,2	37,5	18
02:00 pm	5	1132	26,1	40,2	31,0	17
03:00 pm	6	1022	25,8	35,7	28,8	15
03:15 pm	6.25	962	25,4	32,7	29,1	15

Elaboración propia

**Tabla 4.13** Evaluación del secado solar indirecto (CS2) de papa Canchán, por convección natural (E05)

Código del ensayo		E05: V1,CN,CS2	% hum inicial			77,1 %
Variedad de papa		Canchán	% hum final			9,8 %
Tipo de convección		Natural	Velocidad media aire			- -
Colector solar		CS2	Tiempo de secado total			6 h y 30 min
Hora del ensayo	Tiempo (h)	Peso (g)	T <sub>amb</sub> (°C)	T <sub>aire col</sub> (°C)	T <sub>aire sec</sub> (°C)	%H <sub>rel</sub>
09:00 am	0	4000	17,4	49,0	32,0	17
10:00 am	1	3008	21,5	52,9	40,9	30
11:00 am	2	2368	23,2	49,5	42,8	25
12:00 am	3	1899	25,7	48,0	43,0	23
01:00 pm	4	1532	28,6	49,1	42,5	20
02:00 pm	5	1244	28,1	56,4	45,6	18
03:00 pm	6	1118	29,3	45,9	41,7	17
03:30 pm	6.5	1015	27,9	42,1	39,8	16

Elaboración propia

**Tabla 4.14** Evaluación del secado solar indirecto (CS2) de papa Yungay, por convección natural (E06)

Código del ensayo		E06: V2,CN,CS2	% hum inicial			78,2 %
Variedad de papa		Yungay	% hum final			10,1 %
Tipo de convección		Natural	Velocidad media aire			- -
Colector solar		CS2	Tiempo de secado total			6 h y 45 min
Hora del ensayo	Tiempo (h)	Peso (g)	T <sub>amb</sub> (°C)	T <sub>aire col</sub> (°C)	T <sub>aire sec</sub> (°C)	%H <sub>rel</sub>
09:00 am	0	4000	15,4	34,7	26,8	18
10:00 am	1	3092	18,3	37,4	32,4	28
11:00 am	2	2308	21,8	46,7	37,9	24
12:00 am	3	1854	23,5	57,1	40,4	23
01:00 pm	4	1444	24,0	44,6	30,0	20
02:00 pm	5	1250	23,8	40,4	26,4	19
03:00 pm	6	1066	21,4	38,5	25,5	18
03:45 pm	6.75	970	22,4	39,1	28,4	18

Elaboración propia

**Tabla 4.15** Evaluación del secado solar indirecto (CS2) de papa Canchán, por convección forzada (E07)

Código del ensayo		E07:V1,CF,CS2	% hum inicial			77,1 %
Variedad de papa		Canchán	% hum final			9,8 %
Tipo de convección		Forzada	Velocidad media aire			1,1 m/s
Colector solar		CS2	Tiempo de secado total			6 h y 15 min
Hora del ensayo	Tiempo (h)	Peso (g)	T <sub>amb</sub> (°C)	T <sub>aire col</sub> (°C)	T <sub>aire sec</sub> (°C)	%H <sub>rel</sub>
09:00 am	0	4000	20,1	36,1	31,2	20
10:00 am	1	2568	22,3	41,8	35,9	25
11:00 am	2	1964	25,0	49,2	39,7	23
12:00 am	3	1552	28,0	55,4	35,8	22
01:00 pm	4	1204	27,8	48,3	33,3	20
02:00 pm	5	1048	26,1	42,1	31,0	19
03:00 pm	6	1017	24,3	37,5	32,5	20
03:15 pm	6.25	1015	25,4	38,1	34,0	19

Elaboración propia

**Tabla 4.16** Evaluación del secado solar indirecto (CS2) de papa Yungay, por convección forzada (E08)

Código del ensayo		E08: V2,CF,CS2	% hum inicial			78,2 %
Variedad de papa		Yungay	% hum final			10,1 %
Tipo de convección		Forzada	Velocidad media aire			1,1 m/s
Colector solar		CS2	Tiempo de secado total			6 h y 00 min
Hora del ensayo	Tiempo (h)	Peso (g)	T <sub>amb</sub> (°C)	T <sub>aire col</sub> (°C)	T <sub>aire sec</sub> (°C)	%H <sub>rel</sub>
09:00 am	0	4000	19	37.1	30.7	15
10:00 am	1	2716	20.7	41.5	32.8	22
11:00 am	2	2060	24.5	50.2	39.4	20
12:00 am	3	1576	27.6	49.7	36.6	18
01:00 pm	4	1245	27.8	39.9	30.8	17
02:00 pm	5	1032	24.4	35.6	32.7	18
03:00 pm	6	970	23.1	36.4	35.5	15

Elaboración propia

A partir de los resultados experimentales obtenidos para los ocho ensayos tabulados entre las Tablas 4.9 y 4.16, se expresan complementariamente las siguientes observaciones percibidas:

- La carga de 4,0 kg de trozos húmedos de papa, distribuidas sobre las cuatro bandejas del secador solar indirecto, se logran secar en un día de brillo solar permanente, de unas 6 a 8 horas de radiación solar, variando de acuerdo a cada caso; con una gran ventaja de que el costo de energía térmica para el secado es prácticamente nula frente al gran costo de energía de los secadores convencionales.
- El aire ambiental ingresa a unos 20 °C hacia el colector solar, calentándose hasta unos 50 °C en una estabilización térmica previa que lleva alrededor de una hora (entre las 08:00 a las 09:00 am); luego del cual se cargan la papa trozada húmeda en las bandejas de la cámara de secado.
- La temperatura del aire caliente no es constante durante la evaluación del secado, debido a la variación térmica y condiciones del aire externo conforme transcurren las horas, así como el efecto de las ventilaciones naturales del aire ambiental, que no permiten un estado estable del aire caliente que ingresa a la cámara del secador, situación desventajosa frente a un secador convencional con temperatura controlada.
- El aire caliente que ingresa a unos 50 °C al secador, al entrar en contacto con la carga de papas trozadas húmedas dispuestas en las bandejas, pierde su energía térmica debido a la transferencia de calor hacia la carga sólida para provocar la vaporización y eliminación del agua durante el secado, abandonando el aire húmedo la cámara de secado con unos 35 °C. Estos valores varían de acuerdo a las oscilaciones externas del medio ambiente, así como al tipo de convección utilizada durante el secado.
- El ventilador mecánico instalado hacia la entrada de aire del colector solar plano (parte inferior), incorpora con un flujo casi permanente el aire hacia el colector, atravesando las bandejas que están conteniendo el material húmedo en la cámara de secado, abandonando el aire húmedo a un valor medio de 1,1 m/s; el incremento del flujo de aire a través de todo el sistema disminuye la temperatura del aire caliente, pero contrariamente incrementa la disponibilidad del aire como agente de secado, aumenta los fenómenos convectivos de energía y materia facilitando el secado del material.

- El aire caliente que circula a través de la cámara de secado, cuando éste se va estabilizando térmicamente antes de la carga de los sólidos húmedos, hace que la temperatura del aire que entra y que sale prácticamente tienden a igualarse, tal como se evaluó en la evaluación de la cámara de secado sin carga a través de la Figura 4.12; sin embargo, luego que se cargan las bandejas con los sólidos húmedos, se percibe una rápida disminución de la temperatura del aire húmedo que sale de la cámara con respecto a la temperatura del aire caliente que ingresa, en la primera etapa del secado, ésta marcada diferencia de temperatura se debe a la estabilización térmica inicial de la carga sólida cargada en el sistema así como a la naturaleza del secado adiabático que ocurre en la cámara con gran desprendimiento de humedad en forma de vapor de agua en la etapa antecrítica del secado del sólido, dado que la energía térmica que debe ganar el líquido para eliminarse en forma de vapor denominado como calor latente de vaporización lo debe tomar del aire que rodea al sólido.
- La papa seca obtenida al final, presenta una notoria contracción volumétrica con respecto a la papa húmeda, percibida por el incremento del espacio libre en la distribución de los sólidos que quedan sobre la bandeja en el transcurso del tiempo de secado, lo cual influye en el área neto de secado del material, que en muchos casos es considerado como un valor relativamente constante; en éste caso disminuye conforme transcurre el tiempo de secado, dificultando la aplicación de éste parámetro en la evaluación.

#### **4.4 CARACTERIZACIÓN DE LA PAPA SECA**

El producto final del proceso es la papa seca, que luego del secado obtenido en el secador solar se retira y se deja hasta el día siguiente en una cabina de estabilización final especialmente para la humedad final, luego se procede con el envasado, a fin de garantizar su inocuidad en el proceso de almacenamiento y comercialización; éste procedimiento de elaboración de la papa seca, que involucra en la deshidratación al secador solar indirecto, tiene la ventaja de garantizar un producto limpio y uniforme, sin exposición abierta al medio ambiente externo ni a la radiación solar directa, con una calidad final para su distribución en el mercado local, regional y nacional, y porque no decir internacional. El producto de papa seca obtenida se somete a una

caracterización final, reportándose la información que se presenta en la Tabla 4.17.

**Tabla 4.17** Caracterización de la papa seca obtenida.

Característica	CANCHÁN (V1)	YUNGAY (V2)
Porcentaje de Humedad	8,5±0,7 %	9,1±0,6 %
Porcentaje de Materia seca	91,5±0,7 %	90,9±0,6 %
Densidad aparente	325 kg/m <sup>3</sup>	322 kg/m <sup>3</sup>
Densidad neta	1264 kg/m <sup>3</sup>	1244 kg/m <sup>3</sup>
Contracción volumétrica (papa seca)	23,0 %	21,5 %
Rendimiento (papa fresca : papa seca)	4,6 : 1	4,3 : 1
Porcentaje de rendimiento papa seca con respecto a papa fresca	21,9 %	23,4 %
Precios unitarios	S/ 5,00/kg ± 1,00	S/ 5,00/kg ± 1,00

**Fuente:** Elaboración propia

En la papa seca obtenida usando el secador solar indirecto se reportan adicionalmente las siguientes observaciones:

- La papa seca, en ambas variedades, presenta una ligera coloración amarillenta al final del secado, con una translucidez baja de los trozos de papa seca, relativamente duros al quiebre mecánico, de formas algo retorcidos de los trozos que inicialmente fueron unos paralelepípedos, debido a la gran contracción volumétrica que tienen durante el secado.
- Las papas secas que se retiran de las bandejas son totalmente limpias y libres de agentes externos, como los que si ocurrirían en los secados clásicos a campo abierto o en intemperie, operación que garantiza la calidad final del producto seco.
- El producto debidamente sellado en bolsas, presentan un tiempo prolongado de preservación, no se perciben alteraciones de color ni de textura en el tiempo de almacenamiento, siempre que estén apropiadamente sellados, no expuestos a la luz solar ni a ambientes húmedos.



## **CAPÍTULO V**

### **5 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN**

A partir de la información experimental obtenida y las observaciones descritas en el capítulo anterior, se procede a realizar los cálculos de ingeniería para la generación de los resultados vinculados a los aspectos de balance de materia, balance de energía, rendimiento del colector y de la cámara del secador solar, así como a la determinación de los parámetros de la operación unitaria de secado, vinculados al uso y aplicación del secador solar tipo indirecto incidiendo en la evaluación del rendimiento de la producción de papa seca, a partir de las dos variedades de producción y comercialización de papa más significativas para la región de Ayacucho.

#### **5.1 CONVERSIÓN DE LA ENERGÍA SOLAR EN ENERGÍA TÉRMICA**

La evaluación térmica del secador solar indirecto, requiere el análisis térmico de operación del colector solar y de la cámara de secado, muy a pesar de la evidencia funcional y calentamiento del aire reportado en los experimentos; es pertinente analizar los resultados y estudiar la transformación aprovechable de la energía solar incidente sobre el colector del secador solar en energía térmica para el calentamiento del aire que se desplaza ascensionalmente por cambio de densidad a través de la caja rectangular del colector solar.

##### **5.1.1 Evaluación térmica del colector solar**

La eficiencia térmica del colector solar plano operando en un determinado

periodo de irradiación solar está determinada por el calor útil que genera el colector al provocar el calentamiento del aire que circula por la cámara del colector con respecto a la energía recibida por la incidencia solar sobre dicha placa.

### Calor útil ganado por el aire

A partir del perfil de temperaturas reportado en la Figura 4.11 para el funcionamiento del colector solar plano (modo CS1 expuesto en la Figura 4.5), se puede obtener el calor útil medio ganado por el flujo de aire que circula por el colector solar plano, como una respuesta a la cantidad de energía solar incidente sobre la superficie negra del colector, que viene a ser el calor sensible del aire que calienta desde su temperatura de entrada hasta la salida en estado estacionario, definida por la siguiente expresión:

$$q_u = \dot{m}_{\text{aire}} C_p \Delta T = \left( \frac{Q}{V} \right) (H_2 - H_1) = G_p (H_2 - H_1)$$

Donde:

$q_u$	Calor útil (térmico) ganado por el aire
$\dot{m}_{\text{aire}}$	Flujo másico del aire a través del colector solar plano
$C_p$	Calor específico promedio del aire
$\Delta T$	Variación de temperatura del aire ( $T_2 - T_1$ ) en el colector solar

*En función a las características psicrométricas de aire húmedo:*

$Q$	Caudal del aire ( $\text{m}^3/\text{h}$ )
$V$	Volumen húmedo específico del aire ( $\text{m}^3/\text{kg}_{\text{aire seco}}$ )
$G_p = Q/V$	Flujo másico de aire seco o gas portante ( $\text{kg}_{\text{aire seco}}/\text{h}$ )
$H$	Entalpía específica húmeda del aire ( $\text{kcal}/\text{kg}_{\text{aire seco}}$ )

Datos reportados:

$A_{\text{CS1}} = 1,92 \text{ m}^2$	Área o superficie negra del colector solar plano, modo CS1
$A_f = 0,071 \text{ m}^2$	Área transversal de flujo de aire que sale del colector
$v_{\text{aire}} = 0,11 \text{ m/s}$	Velocidad media del aire caliente (en convección natural)
$T_{\text{amb}} = 25,6 \text{ }^\circ\text{C}$	Temperatura media del aire ambiental
$T_1 = 26,9 \text{ }^\circ\text{C}$	Temperatura media del aire que entra al colector solar
$T_2 = 77,7 \text{ }^\circ\text{C}$	Temperatura media del aire caliente que sale del colector
$C_{p_{\text{aire}}} = 0,25 \text{ kcal}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$	Calor específico promedio del aire
$Q_{\text{aire}}$	Caudal del aire caliente a la salida del colector solar

$\rho_{\text{aire}}$	Densidad del aire caliente, a $T = T_{\text{sal col}}$
$P = 548 \text{ mmHg}$	Presión local
$M = M_{\text{aire}}$	Peso molecular del aire

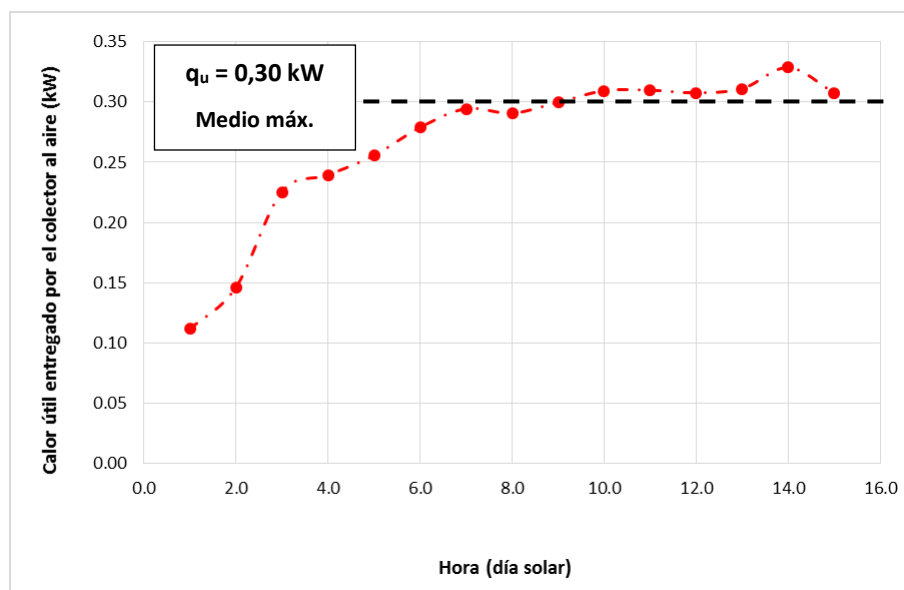
$$Q_{\text{aire}} = A_f v_{\text{aire}} = 0,00781 \text{ m}^3/\text{s} = 28,12 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\rho_{\text{aire}} = \frac{P}{RT} M = 0,723 \text{ kg/m}^3$$

$$m_{\text{aire}} = Q_{\text{aire}} \rho_{\text{aire}} = 20,33 \text{ kg/h}$$

$$q_u = \dot{m}_{\text{aire}} C_p \Delta T = \dot{m}_{\text{aire}} C_p (T_2 - T_1) = 258 \text{ kcal/h} = 0,30 \text{ kW}$$

A partir de la diferencia de temperaturas descrito para el aire que se calienta al pasar por el colector solar plano en función del tiempo de evaluación reportado en la Figura 4.11, se obtiene el diagrama del **calor útil instantáneo** en función del tiempo de estabilización del colector, la cual se incrementa desde el inicio de funcionamiento hasta su relativa estabilización térmica que ocurre aproximadamente a una hora de funcionamiento, alcanzando el valor medio máximo de 0,30 kW de energía útil que gana el aire que asciende a través del colector por convección natural (evaluación realizada sin carga de sólidos en la cámara de secado), como se expone en la Figura 5.1.



**Figura 5.1** Variación del calor útil instantáneo en el arranque y estabilización del colector solar (CS1).

Las fluctuaciones térmicas del sistema son inevitables, que se dan ya sea por la variación de temperatura del aire, variación del nivel de radiación solar, cambios climáticos y otros agentes exógenos no controlados que ocurren permanentemente conforme transcurren las horas del día solar durante el experimento, las cuales afectan la temperatura final del aire caliente entregado por el colector y por ende el rendimiento del colector solar.

### Calor recibido por radiación solar

De acuerdo a las informaciones descritas en los mapas solares y los niveles de incidencia solar descritos en el ítem 2.2.4, consideramos para la región de Ayacucho recibe un valor medio de 6 kW.h/m<sup>2</sup> diaria, que equivale a una irradiancia solar de **I = 250 W/m<sup>2</sup>**, cabe precisar que el nivel de radiación se va incrementando desde la salida del sol hasta un máximo que oscila entre las doce del día a la una de la tarde (que podría superar los 800 W/m<sup>2</sup>) para luego ir decayendo hasta la puesta del sol, siguiendo una trayectoria parabólica. Luego el calor que recibe el colector solar por radiación es:

$$q_{\text{solar}} = I \cdot A_{\text{CS1}}$$

Donde:

$q_{\text{solar}}$	Flujo de energía solar recibida por el colector (kW)
$I = 250 \text{ W/m}^2$	Nivel de irradiancia media incidente sobre el colector
$A_{\text{CS1}} = 1,92 \text{ m}^2$	Área neta del colector solar en modo CS1 (Ref. Tabla 4.8)

$$q_{\text{solar}} = I \cdot A_{\text{CS1}} = 480 \text{ W} = 0,48 \text{ kW}$$

Por lo tanto, la **eficiencia térmica del colector** solar para la conversión media de la energía solar incidente sobre el colector solar (CS1) en energía térmica útil acarreada por la corriente de aire es:

$$\eta = \frac{q_u}{q_{\text{solar}}} = \frac{q_u}{I \cdot A_{\text{CS1}}} = 0,625 \quad \text{que equivale al } 62,5 \%$$

La eficiencia de conversión energética determinada corresponde a una evaluación media para el colector solar plano operando en un día solar normal;

sin embargo, por las razones de variación exógenas indicadas puede variar la eficiencia del colector.

Además, cuando el flujo de aire se incrementa por convección forzada a través del colector solar plano, indiscutiblemente disminuirá la temperatura de salida del aire caliente, debido al alto flujo de masa de aire, la cual afectará las condiciones de secado que ocurrirá en el gabinete o compartimiento de secado; de acuerdo al tipo de convección se reporta una variación de 20 a 70 m<sup>3</sup>/h de caudal de aire medidos en las condiciones de entrada al colector, que permiten alcanzar temperaturas de unos 75 °C a 45 °C para el aire caliente en la salida del colector, la cual ingresará a la cámara de secado.

### 5.1.2 Evaluación térmica de la cámara de secado

El gabinete o cámara de secado del secador solar indirecto, con las dimensiones y detalle de materiales que componen su estructura (ver Figura 4.8), debe de garantizar un sistema de secado adiabático; para lo cual, usando el perfil de temperaturas reportado en la Figura 4.12, se puede evaluar las pérdidas de energía térmica a través de la cámara de secado, determinado por la energía térmica que pierde el aire que circula por dicho compartimiento en una evaluación de operación sin carga sólida o en vacío.

El calor sensible que pierde el aire caliente al circular por la cabina de la cámara de secado sin carga será el calor perdido, que estará vinculado con la eficiencia de aislamiento que presenta dicho compartimiento; considerando que el flujo másico de aire proveniente del colector solar (determinado en el ítem anterior) es el aire caliente que atraviesa la cabina de la cámara de secado, se cumple que:

$$q_{\text{perd}} = \dot{m}_{\text{aire}} Cp \Delta T = \dot{m}_{\text{aire}} Cp (T_3 - T_2)$$

Donde:

$\dot{m}_{\text{aire}}$	Flujo másico del aire que atraviesa la cabina de secado
$Cp$	Calor específico promedio del aire
$\Delta T$	Variación de temperatura del aire ( $T_3 - T_2$ ) en cabina de secado

Datos reportados:

$\dot{m}_{\text{aire}} = 20,33 \text{ kg/h}$	Flujo másico medio que circula por la cámara de secado
$T_2 = 77,1 \text{ °C}$	Temperatura media del aire que entra a la cámara
$T_3 = 76,4 \text{ °C}$	Temperatura media del aire que sale de la cámara
$Cp_{\text{aire}} = 0,25 \text{ kcal/kg.°C}$	Calor específico del aire

$$q_{\text{perd}} = \dot{m}_{\text{aire}} C_p \Delta T = - 3,56 \text{ kcal/h} = - 0,004 \text{ kW}$$

La magnitud de la energía térmica que se pierde en la cámara de secado, representa alrededor del 1,4 % del calor útil que el aire gana en el colector solar; éste valor bajo nos indica buen grado de aislamiento térmico que posee los materiales utilizados en la construcción de la cabina de secado, lo cual garantizará el secado adiabático de la carga de sólidos húmedos en dicha cámara frente al paso de la corriente de aire caliente; considerando además que, en las pruebas de secado con carga sólida húmeda el aire caliente que sale del colector solar ha alcanzado temperaturas de alrededor de los 50 °C, el porcentaje de pérdidas de energía a través de la cámara de secado serán mucho menores del valor determinado.

Con respecto a la variación de las características psicrométricas del aire, se observa que el aire ingresa hacia el colector solar con unos 55 % de humedad relativa, luego del calentamiento en el colector se reduce significativamente la humedad relativa hasta unos 15 %, condición con la cual ingresará a la cámara de secado, cuyo estado favorecerá considerablemente la velocidad de secado de las papas húmedas durante la deshidratación.

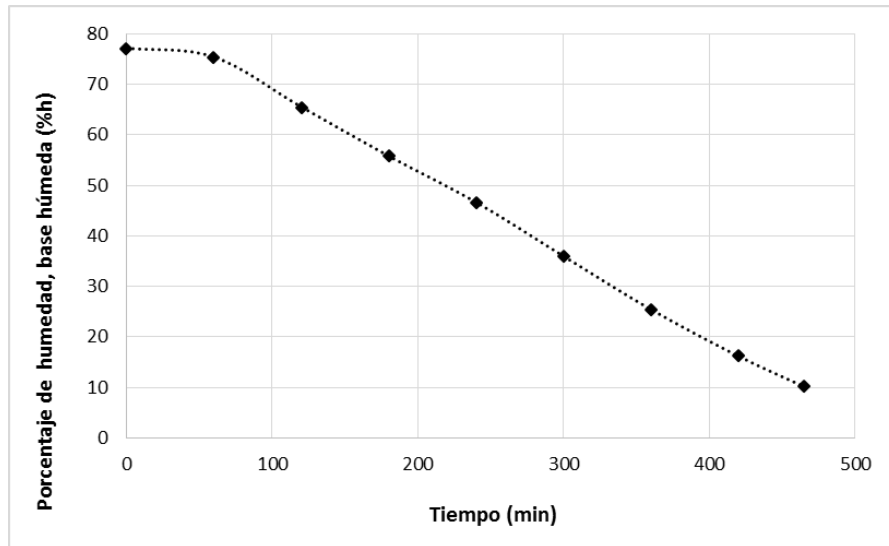
## **5.2 EVALUACIÓN DEL SECADO DE PAPA EN EL SECADOR SOLAR INDIRECTO**

A partir de los resultados experimentales obtenidos en la evaluación del secador solar tipo indirecto aplicado al proceso de elaboración y producción de papa seca reportados en el ítem 4.3.3, se procede a determinar y discutir los diversos tipos de curvas de secado y los diversos parámetros, de acuerdo a los principios funcionales de la operación unitaria del secado.

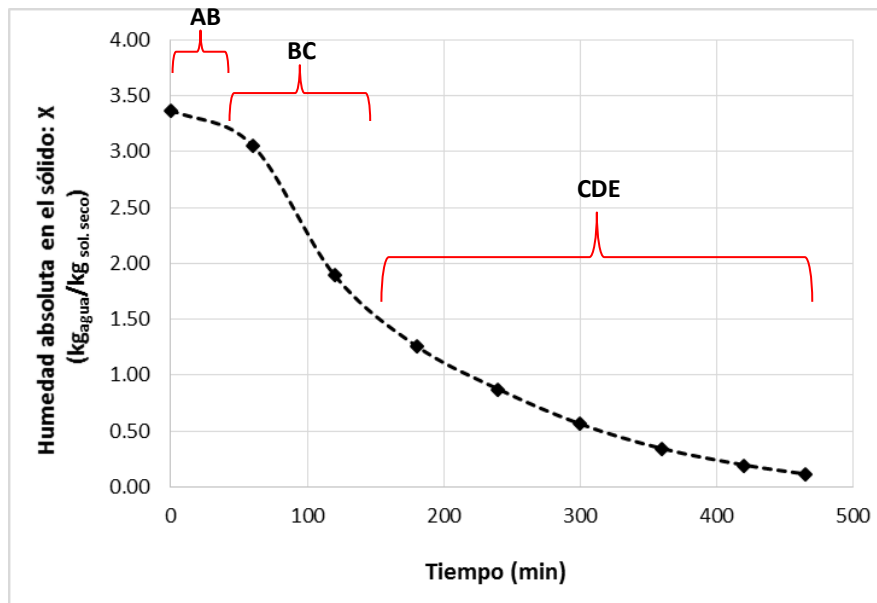
### **5.2.1 Curvas de secado**

En el primer ensayo (E01) realizado para el secado de 4,0 kg de papa cocida trozada de la variedad Canchán, al 77,1 % de contenido de humedad, que se seca en el secador solar indirecto en un tiempo total de 7 h y 45 min, hasta llegar al 10,2 % de humedad (base húmeda), en el estado de convección natural para el aire que circula por el secador solar, cuyos datos experimentales se encuentran en la Tabla 4.9, se evalúan las curvas fundamentales de secado que se exponen a continuación.

Durante el secado se observa la disminución del peso del material, que también se refleja en la disminución del porcentaje de humedad (en base húmeda) así como de la humedad absoluta (en base seca) en el transcurso del tiempo de secado, determinados con las ecuaciones 2.1 y 2.2; fenómenos que se observan en las Figuras 5.2 y 5.3 respectivamente.



**Figura 5.2** Disminución del porcentaje de humedad (base húmeda) durante el secado de papa en convección natural (Ref. E01).

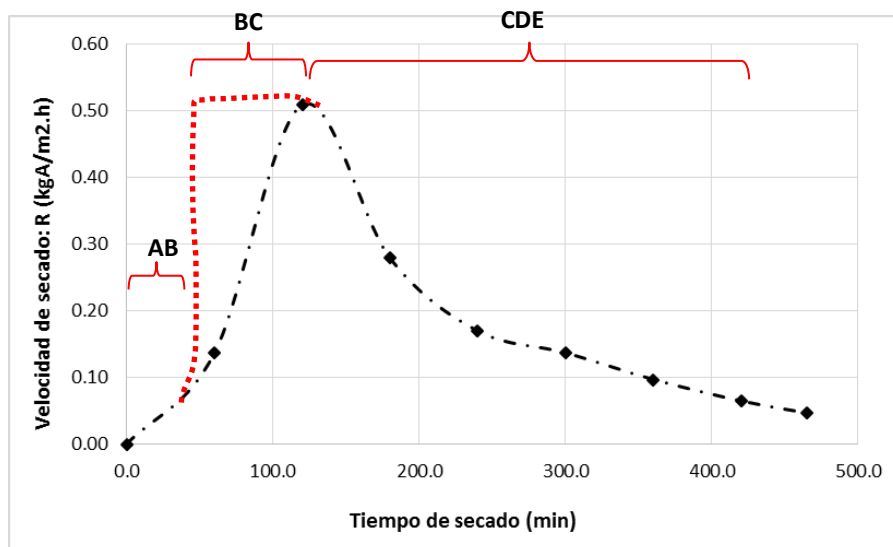


**Figura 5.3** Disminución de la humedad absoluta (base seca) durante el secado de papa en convección natural (Ref. E01).

En la Figura 5.3 se distinguen los tres periodos básicos del secado de la papa, concordantes con la revisión teórica descrita en la Figura 2.12, que son:

- Primer periodo de adaptación térmica o acondicionamiento térmico: tramo AB, que para los casos de convección forzada no se perciben de manera definida por ser muy breves, salvo una evaluación de variación de peso a intervalos de tiempo mucho más cortos.
- Segundo periodo de secado a velocidad constante, tramo BC, conocido también como el periodo antecrítico, que es relativamente breve, caracterizado por la eliminación del contenido de agua periférico del sólido, que ocurre a velocidad constante.
- Tercer periodo de secado a velocidad decreciente, tramo CDE, conocido como el periodo postcrítico, que es el periodo predominante en el caso del secado de la papa, que podría representar alrededor del 75 % del tiempo total de secado; lo cual implica que las condiciones internas señaladas en el ítem 2.5.6 de parámetros del secado, serían el factor controlante y resistivo para el secado, ello implica incrementar el efecto convectivo de transferencia de calor y masa sobre el sólido, no extender los sólidos como un lecho sobrecargado en las bandejas o usar un mayor área de secado, incluso si se pudiera incorporar el movimiento mecánico de los sólidos durante el secado podríamos mejorar el secado.

### 5.2.2 Velocidad de secado

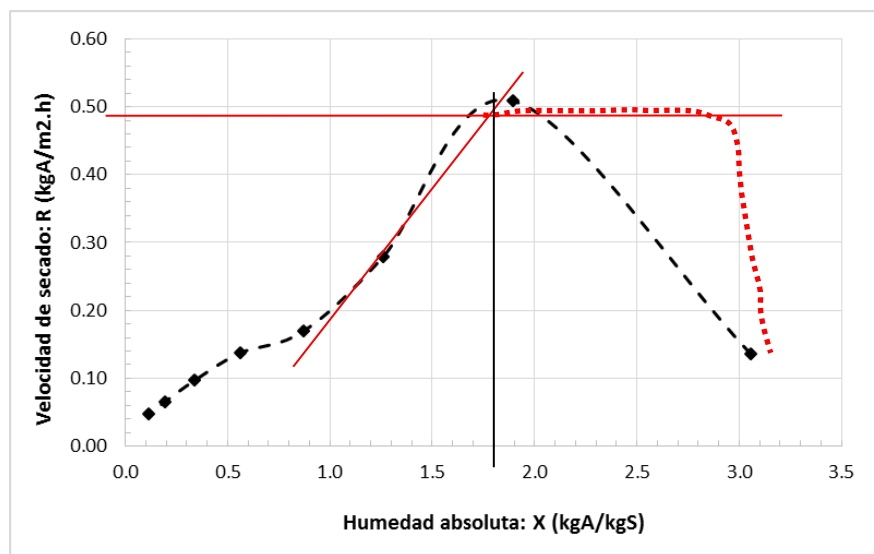


**Figura 5.4** Variación de la velocidad de secado durante el tiempo de evaluación en convección natural (Ref. E01).



A partir del perfil evaluado en la Figura 5.3 se determina la variación de la velocidad de secado utilizando la ecuación 2.4, la cual nos permite evaluar la variación de la velocidad de secado:  $R$ , en función del tiempo y de la humedad absoluta (base seca), tal como se expresan en las Figuras 5.4 y 5.5 respectivamente.

Según los intervalos grandes de tiempo en la experimentación, no se puede apreciar con claridad, la naturaleza de la curva de secado, en el periodo de secado antecrítico (tramo BC) de la Figura 5.4, y probablemente siga la misma trayectoria de la línea entrecortada de color rojo; sin embargo, ello no evita concluir que el periodo de secado postcrítico predomina en el secado de la papa, descrito por la curva de disminución de la velocidad de secado en el tramo CDE de la Figura 5.3.



**Figura 5.5** Curva de secado:  $X$  ( $\text{kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{sol seco}}$ ) vs  $R$  ( $\text{kg}_{\text{agua}}/\text{m}^2.\text{h}$ ) en convección natural (Ref. E01).

La Fig. 5.5, que corresponde a la evaluación del experimento E01, reporta una humedad crítica para el secado de papa Canchán de  $X_{\text{crít}} = 1,72\text{kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{sol seco}}$ , que se alcanza el 63,2 % de contenido de humedad (base húmeda) en el secado, que se inicia con 77,1 %, lo cual reafirma que el periodo antecrítico es relativamente breve, en la cual ocurre un secado a la velocidad constante de  $R_c = 0,48\text{kg}_{\text{agua}}/\text{m}^2.\text{h}$ ; vale decir luego del cual el secado continúa a velocidad decreciente hasta alcanzar la humedad final del 10,2 %; resultados obtenidos para una convección natural del aire que circula a través del secador solar indirecto y operando el colector en el modo CS1, vale decir con el área de

colector de 1,92 m<sup>2</sup>. Este análisis es bastante análogo a la respuesta obtenida para una evaluación del secado de papa a intervalos cortos de tiempo descrita en la Figura 4.16.

Estos resultados se generan de manera similar para los demás ensayos experimentales (E02 al E08), cuyas curvas características se presentan en el Anexo 02, con algunas particularidades específicas, que están en función a los factores evaluados como son la variedad de papa, el tipo de convección utilizado en el secador solar indirecto y la variación del área del colector, que se analizan en el siguiente ítem. Sin embargo, en la siguiente Tabla 5.1 se presenta los resultados de los parámetros de secado obtenidos para cada caso, como son la humedad crítica y la velocidad de secado constante que representa al periodo antecrítico de cada ensayo.

**Tabla 5.1** Determinación de la humedad crítica y velocidad de secado constante para los ensayos de papa seca.

Código del ensayo	Humedad crítica (base seca) X (kg <sub>agua</sub> /kg <sub>sól seco</sub> )	% de humedad crítica (bh)	Velocidad de secado constante (antecrítica) ( kg <sub>agua</sub> /m <sup>2</sup> .h )
E01 (CS1:CN:V1)	1,72	63,2	0,48
E02 (CS1:CN:V2)	2,05	67,2	0,46
E03 (CS1:CF:V1)	1,89	65,4	0,52
E04 (CS1:CF:V2)	2,20	68,8	0,51
E05 (CS2:CN:V1)	2,10	67,7	0,47
E06 (CS2:CN:V2)	2,02	66,9	0,43
E07 (CS2:CF:V1)	1,70	63,0	0,68
E08 (CS2:CF:V2)	1,95	66,1	0,59

**Fuente:** Elaboración propia

### 5.2.3 Características del aire caliente durante el secado

El tránsito del aire a través del equipo no sólo implica cambios de temperatura, también de la variación de su humedad debido al secado que produce en el lecho de sólidos húmedos; debido a la posición altitudinal de la ciudad de Ayacucho, la presión local es del orden de los 548 mmHg, por lo tanto el aire que circula por el colector solar y la cámara de secado opera en un estado isobárico, luego las variaciones de las características y su capacidad de secado se pueden apreciar sobre el diagrama psicrométrico local.

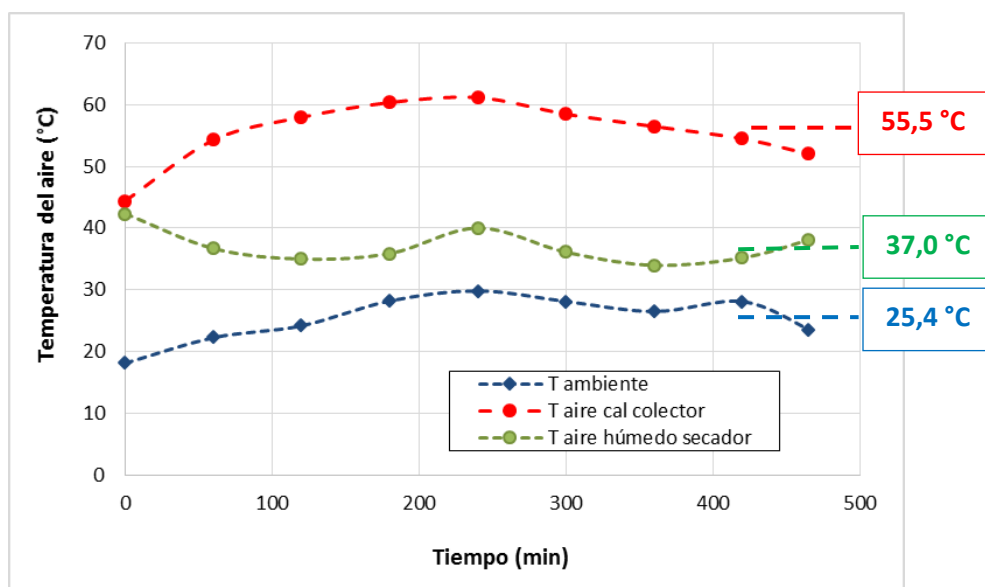
El circuito del aire a través del secador solar indirecto involucra dos etapas bien definidas que son:

- 1) Calentamiento (que ocurre en el colector solar plano)
- 2) Humidificación adiabática (que ocurre en la cámara de secado)

El **calentamiento** del aire se establece en el colector solar plano, percibido por el incremento de la temperatura, que no implica una modificación en la humedad absoluta del aire, pero si se refleja en una gran disminución de la humedad relativa, estado que potencia la capacidad de deshidratar algún material que se ponga en contacto con dicho aire caliente, debido al incremento del potencial de transferencia de calor (por el aumento de temperatura) y de transferencia de masa (por su gran capacidad de secar) con respecto al sólido.

La **humidificación adiabática** está vinculada con el incremento del nivel de humedad absoluta y de humedad relativa que sufre el aire al entrar en contacto con el sólido y provocar la deshidratación de éste, en la cual los fenómenos de transferencia de calor y masa se establecen en un contacto adiabático de la fase gas de aire y la fase sólida de papas, provocando el enfriamiento gradual del aire caliente en la cámara de secado siguiendo una trayectoria isoentálpica.

Para la discusión de lo expuesto, es necesario presentar los resultados de las variaciones de temperatura del aire en el circuito del secador solar indirecto, para su interpretación energética; con los datos experimentales de la Tabla 4.9 se obtiene la Figura 5.6 para el caso del ensayo E01, que representa las variaciones de las temperaturas del aire en el circuito del secador solar indirecto.



**Figura 5.6** Perfiles de temperatura obtenidas durante el secado de papa en convección natural (Ref. E01).

De las tendencias que se perciben en los perfiles de temperaturas expuestas en la Figura 5.6 durante el secado de papa Canchán en convección natural, con el área del colector solar en el modo CS1 (1,92 m<sup>2</sup>), se realizan las siguientes observaciones y discusiones:

- La **temperatura del aire ambiental** se va incrementando conforme transcurren las horas del experimento, desde las 09:00 de la mañana, con una oscilación típica por los movimientos convectivos naturales del aire ambiental y las variaciones de la incidencia solar con el transcurso de las horas del día, notándose una tendencia a disminuir hacia el atardecer; fenómeno natural que no garantiza un estado térmico constante para la operación del colector solar plano y en consecuencia para el aire caliente a usarse como agente de secado; durante el experimento E01 se observa un valor medio de 25,4 °C.
- La **temperatura del aire caliente** obtenido en el **colector solar**, es mucho mayor que la temperatura del aire ambiental, indicando la funcionalidad térmica del colector solar; con el detalle de que, la temperatura del aire caliente sufre una variación en respuesta directa a las variaciones de la temperatura del aire ambiental y el nivel de radiación incidente sobre el colector solar en el transcurso del tiempo de secado; el valor medio reportado es de 55,5 °C.
- La temperatura del aire caliente que entra a la cámara de secado y la del aire (húmedo) que sale de la cámara, al inicio del experimento prácticamente tienen el mismo valor; debido a que, antes de la carga del sólido el secador solar indirecto se ha estabilizado térmicamente, y como las pérdidas de energía térmica en la cabina de secado es baja, estas temperaturas casi se igualan; fenómeno explicado en el perfil de temperatura de la Figura 4.12 para la evaluación de la cámara de secado sin carga.
- La **temperatura del aire húmedo** que abandona la cámara de secado, que viene a ser la resultante del aire caliente que luego de interactuar con el sólido húmedo y provocar el secado del mismo, abandona permanentemente la cámara de secado, disminuye rápidamente en la etapa inicial del secado, debido a la mayor velocidad de secado que se desarrolla en el periodo antecrítico, en la cual se demanda mayor energía para vencer el calor latente de vaporización del contenido de agua y su eliminación como vapor, que influye en el enfriamiento del aire caliente y

su consecuente humidificación; la temperatura media del aire húmedo que abandona la cámara es de 37,0 °C.

- Conforme transcurre el secado, la brecha entre la temperatura del aire caliente que ingresa a la cámara de secado y la temperatura del aire húmedo que abandona dicha cámara, va disminuyendo gradualmente, debido a la reducción del requerimiento de energía térmica para la vaporización del agua en el sólido hacia el tiempo final del secado, en acorde a la disminución de la velocidad de secado que se percibe para el periodo postcrítico.

La trayectoria media del calentamiento y la humidificación adiabática del aire circulando al interior del prototipo de secador solar indirecto (recordando que el término *indirecto* está asociado con el hecho de que la carga sólida no tiene contacto directo con los rayos solares, ya que se encuentra cerrado y aislado dentro de la cámara de secado) se puede observar y comprender sobre el diagrama psicrométrico local expuesto en la Figura 5.7, presentado para el primer ensayo (E01) del secado de la papa Canchán, analizado para los valores medios reportados para el aire circulando isobáricamente a través del secador solar indirecto, que son:

- Aire ambiental que entra al colector solar plano:

$$P = 548 \text{ mmHg,}$$

$$T_1 = 25,4 \text{ °C, } H_{R1} = 55 \%$$

- Aire caliente que sale del colector y entra a la cámara:

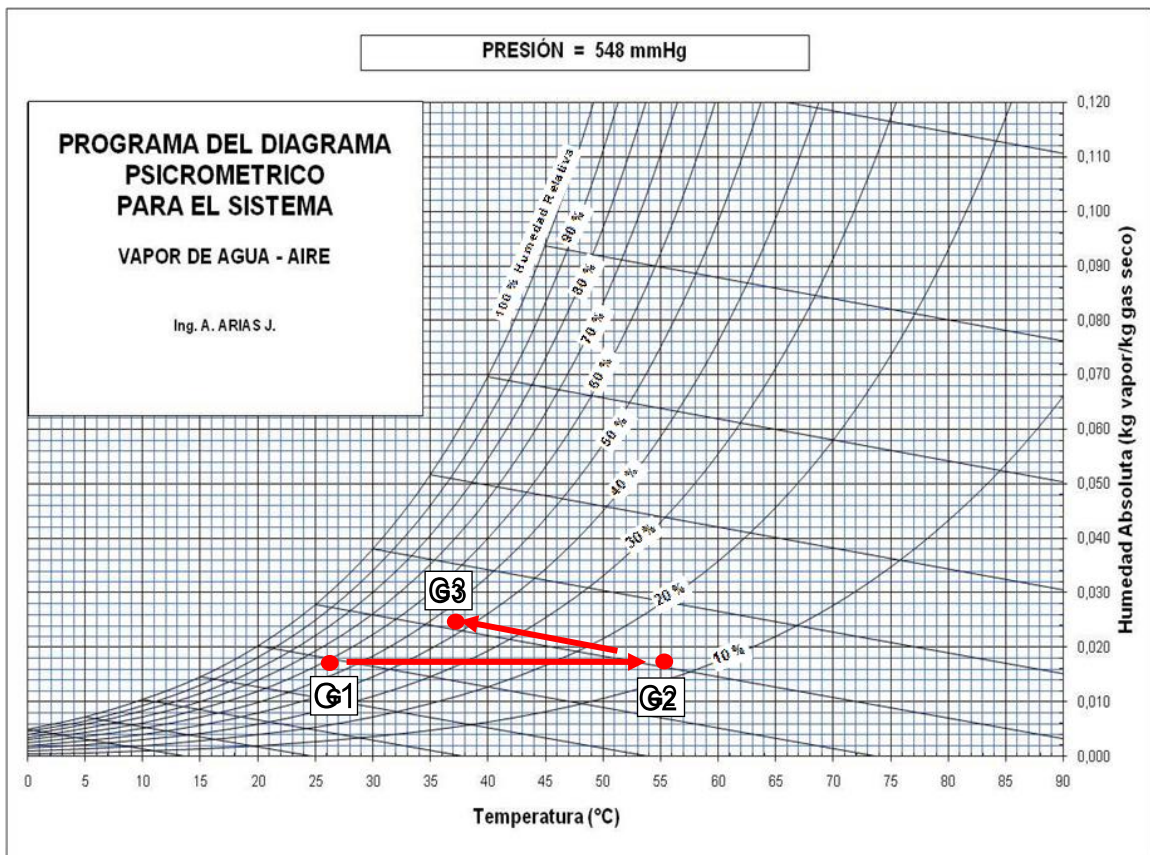
$$T_2 = 55,5 \text{ °C}$$

- Aire húmedo que sale de la cámara de secado:

$$T_3 = 37,0 \text{ °C}$$

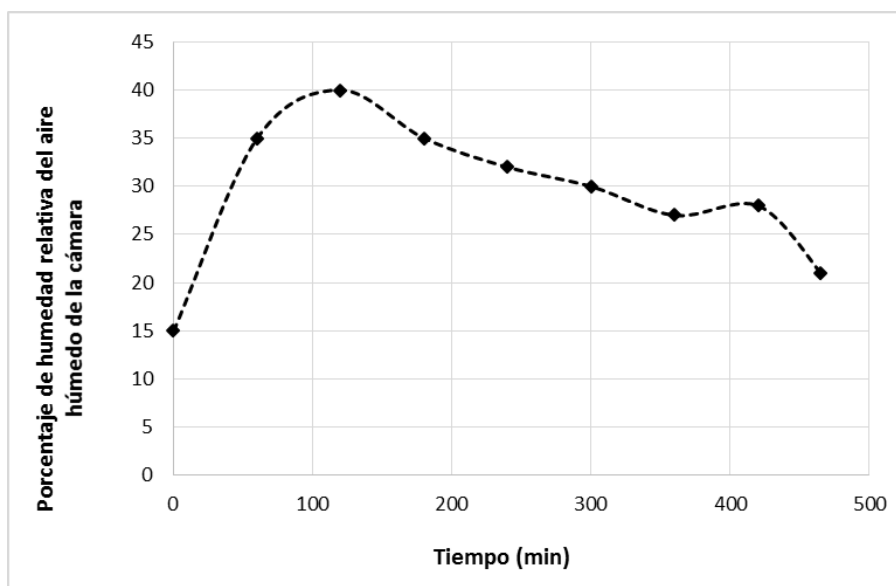
Estos datos se representan sobre el diagrama psicrométrico local, Figura 5.7, observándose que el **calentamiento del aire** en el colector es de trayectoria horizontal (G1 a G2), con incremento de temperatura desde 25,4 ° C hasta los 55,5 ° C, lograda en el colector solar, que reduce considerablemente la humedad relativa desde 55 % a unos 12% para el aire caliente; mientras que, la **humidificación adiabática** es de trayectoria inclinada (G2 a G3) con disminución de la temperatura desde los 55,5 °C hasta los 37,0 °C con incremento de la humedad absoluta y relativa, alcanzando hasta los 40 % de

humedad relativa en el secado de los sólidos; cabe señalar que, esta trayectoria correspondería a la resultante del valor medio estimado en todo el proceso de secado del material; sin embargo la trayectoria puntual varía de acuerdo a la variación de temperaturas y el transcurso del tiempo del secado del material.



**Figura 5.7** Trayectoria del calentamiento y de la humidificación adiabática del aire en el secador solar indirecto (Ref. E01).

Como se ha analizado en la Figura 5.7, en la realidad no se consigue un suministro estacionario del aire caliente hacia la cámara de secado, debido a la dinámica y variaciones propias del aire ambiental y el nivel de incidencia de la radiación solar sobre el colector, que van variando conforme transcurren las horas del día; por lo cual también la temperatura de la cámara de secado así como la temperatura del aire a la salida y su humedad relativa final van variando dentro de ésta dinámica; lo cual se verifica en el perfil del registro de humedad relativa registrado para el aire húmedo que abandona la cámara de secado durante el transcurso del tiempo de secado de la carga de papas en el equipo, expresado en la siguiente Figura 5.8 para el caso del experimento E01.



**Figura 5.8** Variación del % de Humedad relativa del aire húmedo que abandona la cámara de secado (Ref. E01).

La información de la variación del % de humedad relativa para el aire caliente que se va humedeciendo al pasar por el lecho de carga sólida dispuesta en la cámara de secado descrita en la Figura 5.8, guarda relación con los argumentos de la humidificación adiabática que sufre el aire caliente al deshidratar la carga de sólidos; en la primera etapa o periodo de secado antecrítico se percibe una mayor humidificación del aire debido a la mayor velocidad de secado que se desarrolla en dicha etapa, disminuyendo gradualmente con el avance del tiempo de secado debido a la predominancia del periodo postcrítico.

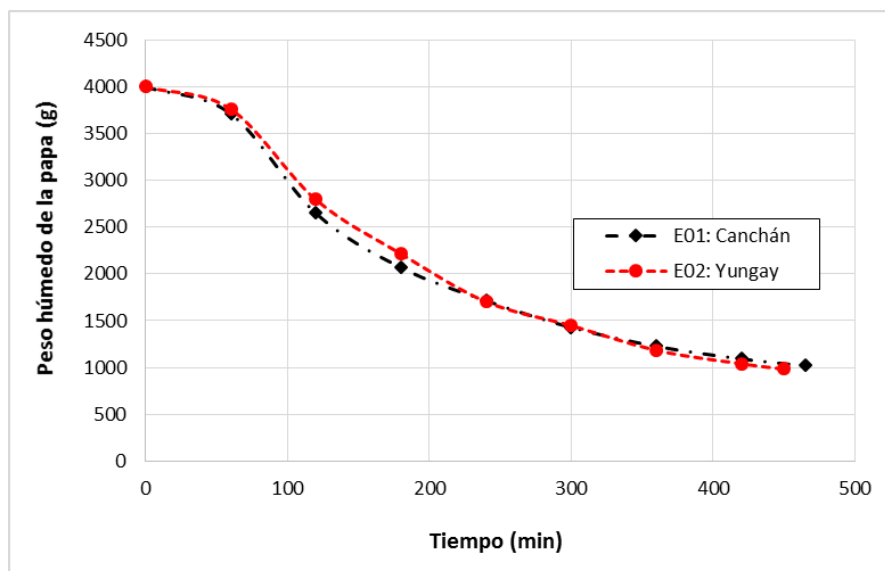
#### 5.2.4 Análisis de los factores evaluados en el secado

Los diversos ensayos experimentales diseñados (E01 al E08), cuyos resultados están expuestos en el capítulo anterior, tienen el propósito de proveer información para fines comparativos de los factores establecidos en la Tabla 4.5, para el propósito de analizar y evaluar la influencia de los mismos en el proceso de secado de la papa.

##### a. Por variedad de la papa a secar

El ensayo E01 y E02 están realizados en el mismo estado de convección natural del aire a través del secador solar indirecto y operando con el colector en el modo CS1 (1,92 m<sup>2</sup>), con la diferencia de que el primer ensayo está realizado para la variedad de papa Canchán (V1) y el segundo para la variedad Yungay

(V2), con la finalidad de evaluar el nivel de influencia de la variedad de papa sobre la dinámica del secado, se comparan en ambas variedades la variación del peso en las mismas condiciones de secado, cuyo resultado se expresa en la siguiente Figura 5.9.



**Figura 5.9** Variación del peso de las variedades de papa Canchán y Yungay, por secado con convección natural (Ref. E01 y E02).

En la Figura 5.9 se puede apreciar que la dinámica de secado para ambas variedades de papa evaluadas presenta una tendencia bastante similar, con una predominancia del periodo postcrítico, ello implica que, las condiciones internas de estructura y naturaleza interna de la matriz sólida tienen un gran factor controlante en la dinámica del secado; además, por la similitud de sus curvas de secado de material ambas variedades tendrían la misma contextura interna como respuesta a la dinámica del secado, con tendencia a incrementar la resistencia a la eliminación del agua y su evaporación con el tiempo de secado, fenómeno que se complementa con la observación de la contracción volumétrica que sufren los trozos de papa durante el secado, que es del orden de los 23,0 % para la variedad Canchán y del 21,5 % para la variedad Yungay, como se ha reportado en la Tabla 4.8, situación que disminuye la porosidad de la papa e incrementa la densidad neta durante el secado dificultando progresivamente la deshidratación. Igual respuesta se observa para ambas variedades de papa en secado con doble área de colector solar en convección natural (ensayos E05 y E06), así como cuando se evalúan en convección forzada para ambas áreas de

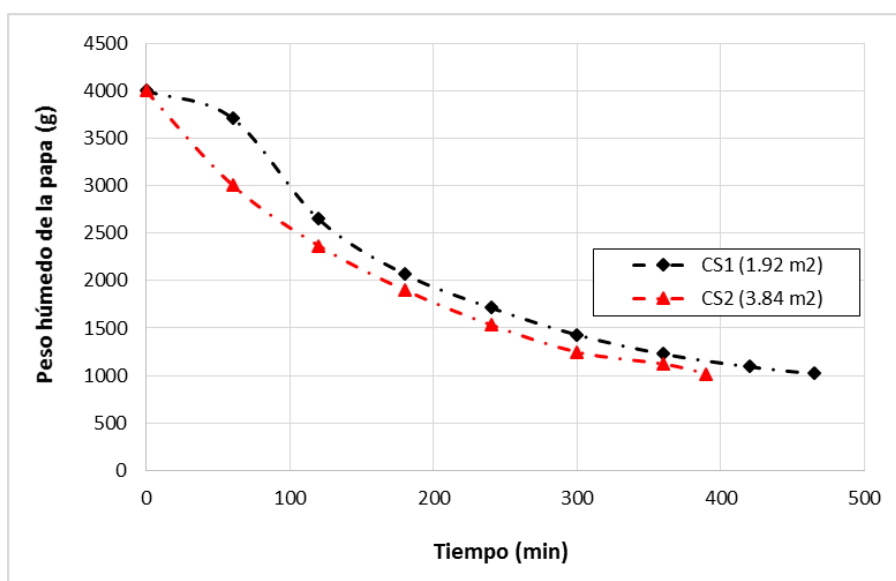


colector estudiadas.

Por los resultados descritos, se afirma que la dinámica del secado no tiene una diferencia significativa frente al tipo de variedad de papa evaluada, por tener ambas una estructura sólida relativamente similar; además, el contenido de humedad inicial determinada para ambas variedades, luego de la cocción y trozado antes de ingresar al secador, tienen valores bastante cercanos entre sí, siendo 77,1 % para el Canchán y 78,2 % para el Yungay (base húmeda). Se considera que la variedad de papa podría influir en el sabor final de la papa seca, que determinará su aplicación y uso preferido por los consumidores, no evaluado en el presente trabajo de investigación.

### b. Según el área del colector solar plano

De acuerdo a la descripción del secador solar indirecto utilizado para la investigación, el funcionamiento del colector solar plano tiene dos modos de operación, que permite operar bajo dos alternativas de área de colector: CS1 y CS2, tal como se especifica en la Tabla 4.8; luego, la influencia del área del colector solar lo discutimos para los ensayos E01 y E05, en las cuales se utiliza la misma variedad de papa que es Canchán y el mismo modo de convección de aire que es la convección natural, a través de la dinámica de variación del peso durante el tiempo de secado conseguido en el secador solar indirecto, que se aprecia en la siguiente Figura 5.10.



**Figura 5.10** Influencia del incremento del área del colector solar sobre el secado de papa Canchán en convección natural (Ref. E01 y E05)

En la Figura 5.10 se puede apreciar que, el incremento del área del colector solar de 1,92 m<sup>2</sup> en función (1) a 3,84 m<sup>2</sup> en función (2), hace que la dinámica del secado de papas sea más rápido, especialmente en las primeras horas que corresponden al periodo antecrítico, en la cual tiene una influencia significativa la dinámica de las condiciones externas, como es el aire caliente que circula por el lecho de los sólidos. Igual respuesta se percibe en la evaluación de la variedad de papa Yungay para las dos áreas del colector solar en convección natural, a través de los ensayos E02 y E06.

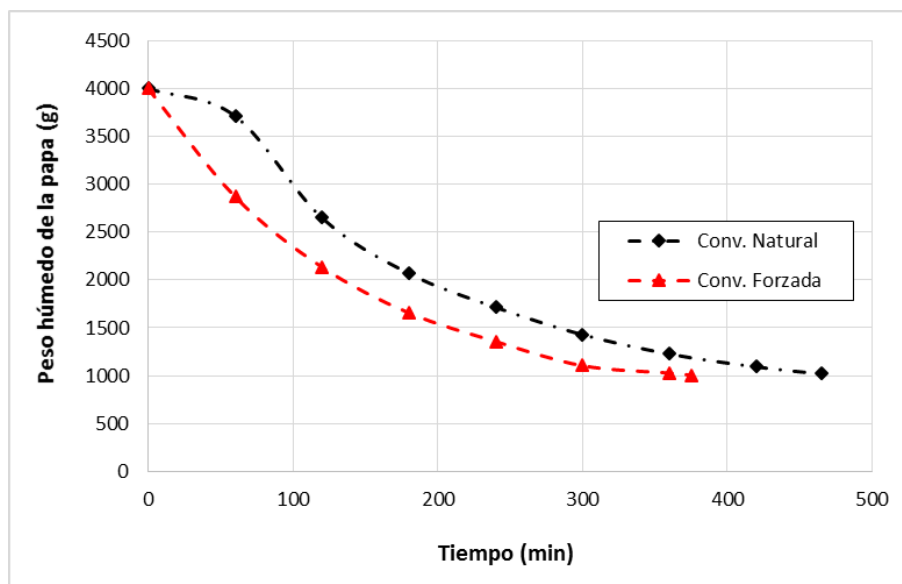
Cuando en el funcionamiento del colector se duplica el área del colector no se percibe un incremento notorio en la temperatura del aire caliente, pero sí un mayor caudal de aire caliente disponible que ingresar hacia la cámara de secado, percibido por el grado de enfriamiento del aire durante el secado adiabático, con una mayor reducción media de 55,5 °C hasta 37,0 °C ( $\Delta T=18,5$  °C) para el aire caliente suministrado por el colector solar CS1 en el ensayo E01, y una menor reducción de 49,1 °C a sólo 41,0 °C ( $\Delta T = 8,1$  °C) para el colector solar CS2 en el ensayo E05, porque cuando un mayor flujo de aire caliente para la misma carga de sólidos húmedos hace que no disminuya mucho su temperatura; por lo tanto, el incremento del área del colector solar plano incrementa la disponibilidad del aire caliente hacia el secador, que mejora la velocidad de secado en el periodo antecrítico pero que luego en el periodo postcrítico pasa a ser controlado por las condiciones internas del secado referidas a la estructura interna de las papas.

### **c. Por el tipo de convección de aire para el secado**

Para analizar la influencia del tipo de convección utilizada: natural y forzada, en la dinámica del secado, se presenta la variación del peso de papa de la variedad Canchán en el colector solar CS1 (1,92 m<sup>2</sup>) entre la convección natural y forzada determinadas con los ensayos E01 y E03, que se presentan en la Figura 5.11.

Para el caso de la convección forzada utilizando un ventilador de impulsión, se percibe el incremento de un 8,3 % en la velocidad de secado constante en el periodo antecrítico de 0,48 a 0,52kg<sub>agua</sub>/m<sup>2</sup>.h con respecto a la convección natural, para la variedad Canchán en el colector solar CS1; igual tendencia se registra para la variedad Yungay, con un incremento del 10,9 % en su velocidad de secado; estos porcentajes de incremento de velocidad de secado por

convección forzada frente a la convección natural son mucho más resaltantes para el caso del colector solar CS2 o de mayor área; vale decir que, dado que el incremento del área incrementa la disponibilidad de ingreso de aire caliente hacia el sistema, esto es sumado con la convección forzada, que incrementan la velocidad de secado, que es resaltante en el periodo antecrítico, a pesar del breve tiempo que ello implica frente al periodo postcrítico.



**Figura 5.11** Influencia del tipo de convección natural y forzada sobre la curva de secado de papa Canchán en el CS1 (Ref. E01 y 03)

El efecto de la convección forzada del aire frente a la convección natural es mucho más notoria en la velocidad de secado con respecto a la trayectoria por convección natural, tal como se evidencia en la Figura 5.11; debe recordarse que, el hecho de forzar la circulación del aire a través del secador solar hace que la temperatura del aire caliente disminuya a la salida del colector pero no disminuya fuerte al atravesar por la cámara de secado, tal como se explicó anteriormente.

El incremento de la velocidad de secado en la convección forzada se debe a la mayor capacidad de remoción de agua que provoca el aire circulando a mayor velocidad por el lecho de sólidos. En términos técnicos, conviene inducir la convección forzada en el secador solar indirecto, dado a que no se penaliza el costo de energía para el secado, debido al costo nulo que representa el uso de la energía solar; sin embargo, para un mejor aprovechamiento energético del aire al interior de la cámara se debe recomendar la convección forzada interna del aire en la cámara o gabinete del secador, sin que ello signifique

necesariamente la alta velocidad de circulación y eyección del aire caliente del sistema.

### 5.2.5 Energía térmica neta para el secado de la papa

La energía térmica neta que requiere una carga de papas cocidas y trozadas en la cámara de secado, es determinada siguiendo los conceptos y expresiones de balance de materia y energía para el secado de sólidos expuesto en el ítem 2.4.6, de acuerdo a los datos térmicos y propiedades específicas que demandan cada tipo de ensayo desarrollado en el capítulo anterior (ensayos E01 al E08); se recuerda que, la magnitud del calor neto para el secado del sólido:  $Q_{ns}$ , está determinado en mayor porcentaje por el calor latente que requiere la vaporización del agua líquida contenida en el sólido para su eliminación durante la deshidratación dinámica. El calor neto requerido para cada carga ensayada se presenta en la siguiente Tabla 5.2.

**Tabla 5.2** Calor neto requerido por la carga sólida para el secado adiabático en la cámara de secado solar.

Código del ensayo	Temperatura de descarga del sólido: $T_w$ (°C)	Calor neto para el secado del sólido ( kcal )
E01 (CS1:CN:V1)	34	1768
E02 (CS1:CN:V2)	34	1792
E03 (CS1:CF:V1)	35	1769
E04 (CS1:CF:V2)	33	1790
E05 (CS2:CN:V1)	40	1780
E06 (CS2:CN:V2)	29	1784
E07 (CS2:CF:V1)	32	1766
E08 (CS2:CF:V2)	31	1789

**Fuente:** Elaboración propia

Debe recordarse que la carga inicial de papas cocidas trozadas en todos los casos es de 4,0 kg, y que el mayor requerimiento de la energía térmica para el secado está en función a la cantidad de agua eliminada durante la deshidratación del material, de acuerdo a las expresiones de balance de materia se afirma de que la cantidad de vapor eliminado bordea el orden de los 75,5 % de la carga inicial, vale decir que de cada 100 kg de papas húmedas sometidas a secado se eliminan un promedio de 75,5 kg de agua; por lo tanto, la energía térmica para el secado es relativamente alto, determinándose que el calor neto

requerido tiene un valor medio de los 1780 kcal por cada carga de 4,0 kg de papa húmeda evaluada en la investigación, esto equivale a un requerimiento de 445 kcal/kg de carga húmeda de papas o de 1 816 kcal/kg de papa seca producida

### 5.2.6 Tiempo de secado total

Para los distintos ensayos se tienen diferentes tiempos de secado total, reportados en los experimentos del capítulo anterior entre las Tablas 4.9 a 4.16, para una carga de 4,0 kg de papas trozadas húmedas en todos los casos, evaluadas para la variedad Canchán y Yungay, con dos áreas de colector solar y con convección natural y forzada, que se resumen en la siguiente Tabla 5.3.

**Tabla 5.3** Variación de % de humedad (base húmeda) de la carga de papas y tiempo de secado.

Código del ensayo	Factores evaluados	% humedad inicial	% humedad final	Tiempo de secado solar
E01 (CS1:CN:V1)	Papa Canchán Convección Natural Colector solar CS1	77,1	10,2	7 h y 45 min
E02 (CS1:CN:V2)	Papa Yungay Convección Natural Colector solar CS1	78,2	11,5	7 h y 30 min
E03 (CS1:CF:V1)	Papa Canchán Convección Forzada Colector solar CS1	77,1	9,0	6 h y 15 min
E04 (CS1:CF:V2)	Papa Yungay Convección Forzada Colector solar CS1	78,2	9,4	6 h y 30 min
E05 (CS2:CN:V1)	Papa Canchán Convección Natural Colector solar CS2	77,1	9,8	6 h y 30 min
E06 (CS2:CN:V2)	Papa Yungay Convección Natural Colector solar CS2	78,2	10,1	6 h y 45 min
E07 (CS2:CF:V1)	Papa Canchán Convección Forzada Colector solar CS2	77,1	9,8	6 h y 15 min
E08 (CS2:CF:V2)	Papa Yungay Convección Forzada Colector solar CS2	78,2	10,1	6 h

**Fuente:** Elaboración propia

A partir de los datos resumidos en la Tabla 5.3 se percibe que las cargas de 4,0 kg de papas húmedas fueron secadas en un día solar con radiación permanente de 6 a 8 horas en los distintos casos; el tiempo de secado se reduce relativamente con la convección forzada del aire de secado a través del equipo y

también con el incremento del área del colector solar; pero no tienen un gran efecto debido a la predominancia del periodo de secado postcrítico, en las cuales el factor controlante del secado son las condiciones internas del material sólido, que están referidas a la naturaleza y estructura interna y porosidad de la papa que interactúan con el agua ocluido.

### 5.3 RENDIMIENTO PRODUCTIVO DE LA PAPA SECA

Finalmente, se evalúa el rendimiento de la producción de la papa seca de acuerdo a las características de la materia prima, la incidencia solar y el prototipo del secador solar indirecto construido.

En la siguiente Tabla 5.4 se resumen los aspectos del rendimiento en la producción de la papa seca, en términos generales del proceso global de elaboración y producción de papa seca desde la manipulación de la materia prima adquirida en el mercado local, así como del rendimiento específico en la operación del secado solar evaluado.

**Tabla 5.4** Rendimiento de producción de la papa seca de acuerdo a la variedad procesada.

Variedad	Rendimiento en el proceso de producción global	Rendimiento en la operación del secado solar
Papa Canchán	21,9 kg/100 kg 21,9 % (1 : 4,6)	25,0 kg/100 kg 25,0 % (1 : 4,0)
Papa Yungay	23,4 kg/100 kg 23,4 % (1 : 4,3)	24,0 kg/100 kg 24,0 % (1 : 4,2)

**Fuente:** Elaboración propia

En el cálculo del rendimiento con respecto al proceso de producción global, es el rendimiento de producción de papa seca que se obtiene en todo el proceso con respecto a la materia prima que llega a la planta, que son cifras de interés para aquellos productores que desearían procesar y obtener papa seca, que involucra entre las partes de todo el proceso la eliminación de materiales extraños, tierras, incluso cáscaras y pérdidas por manipulación; mientras que, el rendimiento

calculado en la operación del secador solar (aparentemente mayor) es el resultado estrictamente alrededor del secador, en la cual se expresa la papa seca obtenida en el secador solar indirecto con respecto a las papas cocidas y trozadas que ingresan a dicho secador.

## CONCLUSIONES

1. La eficiencia térmica de la energía solar transformada, sobre el colector solar (CS1) del secador solar indirecto, determinada por la relación de la energía transformada en el colector prototipo, respecto a la irradiancia media para Ayacucho, fue de 62,5 %
2. El porcentaje de humedad y materia seca, son las principales características de la papa, siendo sus valores respectivos, para la variedad Canchán de  $78 \pm 2,5$  % y  $22 \pm 2,5$  %, y para la variedad Yungay de  $76 \pm 3,1$  % y  $24 \pm 3,1$  %.

En la evaluación del secador solar tipo indirecto, se toman en cuenta los siguientes aspectos: Las variedades de papa elegidas, Canchán y Yungay. Luego el tamaño del área del colector, el primero (CS1) con un área de recepción de irradiancia solar de  $1,92 \text{ m}^2$ , y el segundo (CS2) con doble de área de  $3,84 \text{ m}^2$ . Finalmente, el aspecto de la naturaleza de convección del flujo de aire, tanto de convección natural (CN), como de convección forzada (CF), para lo cual se utiliza un pequeño ventilador eléctrico de 60 W de potencia, instalada en la entrada del colector.

3. La eficiencia térmica que desarrolla el colector solar, del secador solar indirecto, repercute sobre el rendimiento de producción de la papa seca. Obteniéndose para la variedad Canchán, que por cada 100 kg de materia prima que llega a la planta de procesamiento, se obtuvo 21,9 kg de producto final (*papa seca*), y representa el 21,9 % de rendimiento. Y para la variedad Yungay, por cada 100 kg de materia prima que llega a la planta de procesamiento, se obtuvo 23,4 kg de producto final (*papa seca*), que representa el 23,4 % de rendimiento.
4. Para determinar los parámetros de la velocidad de secado, se tomó como referencia el ensayo E01, debido a que los siguientes ensayos del E02 al E08, resultan similares al primero. Reportándose en el ensayo referido, de secado de papa Canchán, una humedad crítica de 63,2 % bulbo húmedo, a partir de una humedad inicial de 77,1 %, que corresponde a una velocidad de secado de  $R_c = 0,48 \text{ Kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{m}^2.\text{h}$ , que alcanza una humedad final de 10,2 % de *papa seca*, con las condiciones del tipo de convección de aire natural y operando con el colector CS1; y se concluye finalmente que, el periodo de secado antecrítico es relativamente breve, en comparación al periodo post crítico, que resulta más prolongado. En la Tabla 5.1 muestra los distintos resultados, propios para cada ensayo.

El tiempo de secado, para una carga 4,0 kg de papas cocidas, húmedas y trozadas en un tamaño comercial de 1 cm x 1 cm x 5 cm, tiras de forma de un paralelepípedo, dispuestos sobre las cuatro bandejas del secador solar indirecto, toma de entre 6 a 8 horas de secado, para un día normal de radiación solar.



## **RECOMENDACIONES**

1. El valor de la eficiencia térmica del secador solar indirecto de 62,5 %, implica un alto rendimiento de conversión energética sobre todo barato, siendo así esta ventaja, es conveniente utilizar secadores solares tipo indirecto, que permite mejorar la calidad del producto (*papa seca*).
2. El uso del colector, con mayor área de recepción de irradiancia solar, favorece el secado y del mismo modo si a esta alternativa se adiciona el tipo de convección mejora aún más el secado
3. Para un mejor aprovechamiento energético del aire al interior de la cámara se recomienda el uso del tipo de convección forzada del aire en la cámara interna del secador, sin que ello signifique necesariamente la alta velocidad de circulación y eyección del aire caliente del sistema.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 Aguilar T. Jhenny N., 2012, **Estudio de pre factibilidad para la instalación de una Planta procesadora de papa (*Solanumtuberosum*) para la producción de papa seca en la provincia de Santiago de Chuco – La Libertad**, Tesis Ing. Agroindustrial, EIA – FI, Univ. César Vallejo, Trujillo, Perú.
- 2 Almada M. et. al., 2005, **Guía de uso de secadores solares para frutas, legumbres, hortalizas, plantas medicinales y carnes**, Fundación Celestina Pérez de Almada, Asunción, Paraguay.
- 3 Arenas D.A. & Zapata H.S., 2011, **Libro interactivo sobre Energía solar y sus aplicaciones**, Proyecto de grado, Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia.
- 4 Arias J. Alfredo, 2011, **Fundamentos y Aplicaciones de Transferencia de Masa**, 2da. ed., FIQM – UNSCH, Edit. PRAKTICO, Ayacucho, Perú.
- 5 Arun S. Mujumdar, 2006, **Handbook of Industrial Drying**, 4ta. ed., Edit. CRC Press, Taylor & Francis Group – LLC, New York, USA.
- 6 CengelYunus A., 2002, **Heat Transfer, A Practical Approach**, 2da. ed., McGraw Hill Education, USA.
- 7 DELTA VOLT SAC, **Atlas Solar: Mapas de la Radiación Solar del Perú**, Copyright © 2010-2018 - Delta Volt SAC, <http://deltavolt.pe/atlas/atlassolar>.
- 8 EnerAgen, 2007, **Energía solar Térmica y fotovoltaica en el marco del Código Técnico de la Edificación**, Guías eneragen, Ayuntamiento de Pamplona – Asociación de Agencias Españolas de Gestión de la Energía, España.
- 9 Espinoza S. Jaime, 2016, **Innovación en el deshidratador solar**, Ingeniare. Rev. Chilena de Ingeniería, Vol. 24, Nro. especial Arica, Agosto 2016.
- 10 García Luis E. et al., 2012, **Diseño y construcción de un deshidratador solar de frutos tropicales**, AVACES Investigación en Ingeniería, Vol. 9 – No. 2 (2012)
- 11 Geankoplis C.J., 1998, **Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias**, 3ra.ed, Edit. CECSA, México.
- 12 Henley E.J., Seader J.D. & Roper D.K., 2011, **Separation Process Principles: Chemical and Biochemical Operations**, 3ra. ed., Edit. John Wiley & Sons, Inc., USA.
- 13 Holman J.P., 1999, **Transferencia de Calor**, 10ma reimpresión, Edit. CECSA, México.
- 14 IV CENAGRO, 2013, **IV Censo Nacional Agropecuario 2012, Resultados Definitivos**, INEI, Perú.
- 15 ManfredHorn, 2016, **Historia de la Asociación Peruana de Energía Solar**, APES PeruSolar, <http://www.perusolar.org/quienes-somos/historia/>

- 16 McCabe W.L., Smith J.C. & Harriot P., 2002, **Operaciones Unitarias en Ingeniería Química**, 6ta. ed., Edit. McGraw Hill, México.
- 17 Mendoza R. César A., 2011, **Viabilidad técnica-económica de una central solar termoeléctrica de colectores cilíndricos parabólicos para su implementación en México**, Tesis de Ing. Electrónico, DIE-FI-UNAM, Univ. Nac. Autónoma de México,
- 18 MINAGRI, 2017, Boletín Producción Nacional de Papa, **Papa: características de la Producción Nacional y de la Comercialización en Lima Metropolitana**, Ministerio de Agricultura y Riego, Dirección General de Políticas Agrarias, Perú.
- 19 NTP 011.119, 2010, **Papa y derivados. Papa. Definiciones y Requisitos**, Norma Técnica Peruana, INDECOPI, Lima, Perú.
- 20 Perry R.H. et. al., 2008, **Perry's Chemical Engineeris' Handbook, Section 12**, 8th. ed., Edit. McGraw Hill Companies, USA.
- 21 PROGENSA, 2009, **La energía solar, Aplicaciones prácticas**, Promotora General de Estudios SA, 5ta. ed., España.
- 22 Rivasplata C. César et. al., 2003, **Diseño y Evaluación de un Secador Solar para el secado industrial del Tomate**, Proyecto de Investigación supervisado por COIN, Facultad de Ciencias, UNJBG-Tacna, Perú.
- 23 Sánchez A. Jorge A., 2009, **Diseño y construcción de un secador para cochinilla de 300 kg/mes de capacidad de producción**, Tesis de Ing. Mecánico, FIM – UNI, Lima, Perú.
- 24 SE, 2008, **Energías Renovables: Energía Solar**, Secretaría de Energía – DGCAF, Argentina.
- 25 SENAMHI, 2003, **Atlas de Energía Solar del Perú**, Dirección General de Investigación y Asuntos Ambientales – SENAMHI, DEP-MEM, Lima-Perú.
- 26 Sharma Shri K., et al., 2003, **Ingeniería de alimentos: operaciones unitarias y prácticas de laboratorio**, Edit. LimusaWiley, España.
- 27 SimáM. Efraín, 2009, **Estudio teórico – experimental de un prototipo de Secador Solar Industrial**, Tesis doctoral, Cs. Ing. Mecánica, DIM, CENIDET, Cuernavaca, México.
- 28 Tablas Peruana de Composición de Alimentos, 2009, **Tablas U: Tubérculos, raíces y derivados (papa seca)**, Centro Nacional de Alimentación y Nutrición INS – MINSA, Lima, Perú.
- 29 Torres M. Maira C. y Vega M. Daniela, 2015, **Evaluación de un sistema de secado con energía solar, para deshidratar los residuos orgánicos generados en el restaurante del Bloque D de la Universidad Libre sede Bosque Popular**, Trabajo de grado de Ing. Ambiental, Departamento de Ing. Ambiental, FI – UL, Bogotá, Colombia.

- 30 Treybal R.E., 1968, **Operaciones de Transferencia de Masa**, 2da. ed., Edit. McGraw Hill, N.Y. USA.
- 31 Vidal S. Adrián et. al., 2012, **Diseño y construcción de un secador solar portátil**, Academia Journals, Congreso Internacional de Investigación, ISSN 1946-5351, Vol. 4, No 2, Veracruz, México.
- 32 Vitor M. Omar, 2014, **Determinación del tiempo de secado de la quinua (*Chenopodium quinoa*) usando un secador solar mixto e indirecto en Ayacucho**, Tesis de Ingeniero en Industrias Alimentarias, EP Ing. en Industrias Alimentarias – FIQM – UNSCH, Ayacucho, Perú.
- 33 Yenque J. y Cancino N., 2001, **Tipos de Secadores Solares**, Industrial Data, (4) 2: 91-92, BD Alicia.

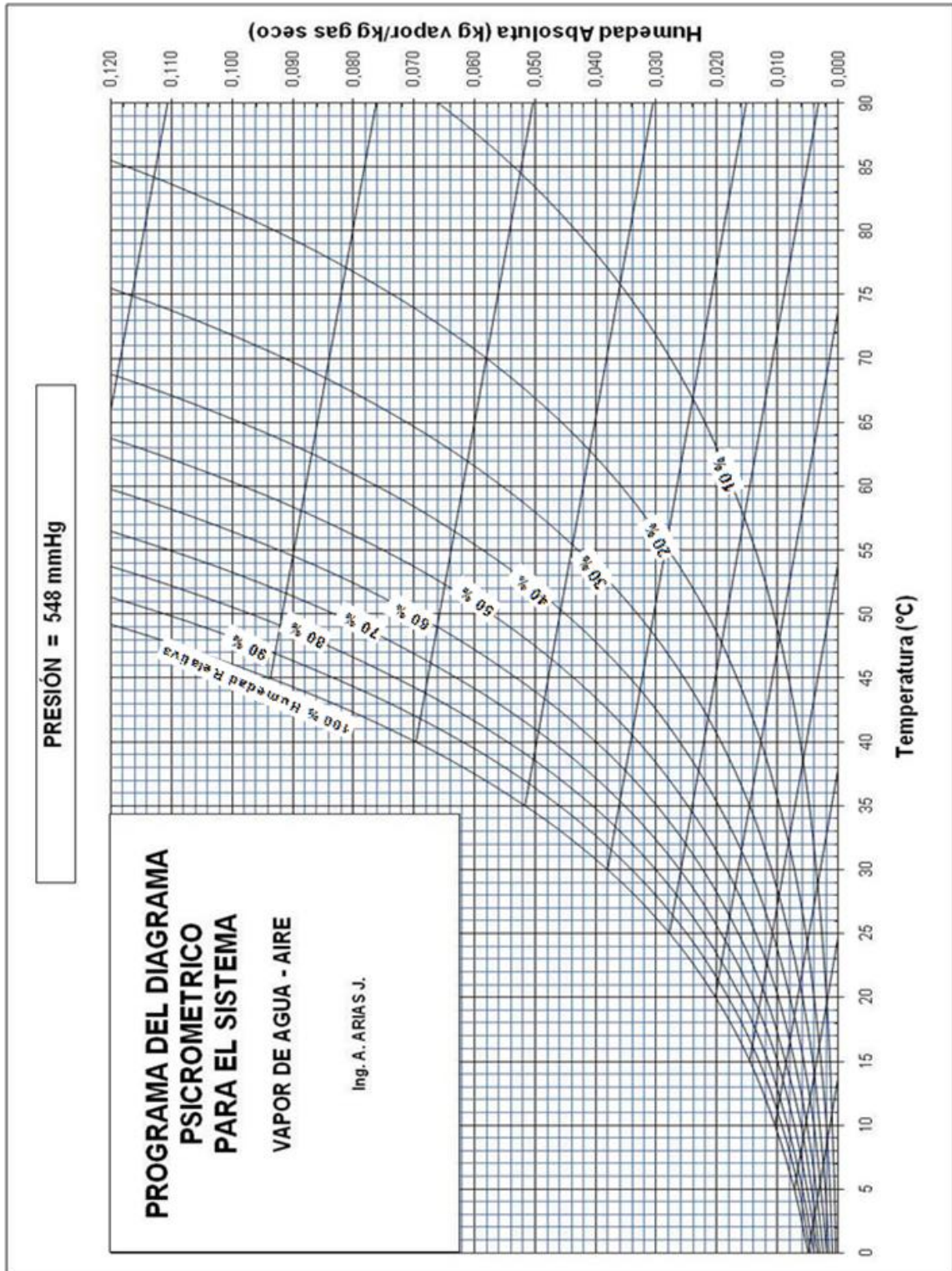
#### Páginas de Internet:

- 1 ANTUSOL, 2010, **Energía Solar Fotovoltaica, Instalación Sistema Fotovoltaico**, <http://antusol.webcindario.com/instalacion.html>
- 2 Blanco-Cano X, 2009, **El Sol, nuestra estrella**, Departamento de física espacial, Revista Digital Universitaria, Vol. 10 Nro. 10, UNAM, México.
- 3 **Solar**, <http://meteo.navarra.es/definiciones/>
- 4 Cabrera JM, 2011, **Captador solar plano: Energía Alternativa**, <https://juanmacabrera.files.wordpress.com/2011/08/captador-solar-plano.pdf>
- 5 CalculationSolar Blog, 2013, **Estimación radiación solar, Cálculo instalación fotovoltaica aislada de red**, <http://calculationsolar.com/blog/?cat=2>
- 6 Chávez P, 2008, **La papa, Tesoro de los Andes**, Fundacio Cátedra Iberoamericana UIB – CIP, [http://fci.uib.es/digitalAssets/177/177040\\_peru.pdf](http://fci.uib.es/digitalAssets/177/177040_peru.pdf)
- 7 FAO, 2008, **Año Internacional de la Papa, La Papa, Variedades, Utilización**, <http://www.fao.org/potato-2008/es/lapapa/utilizacion.html>
- 8 García B. Henry, 2005, **Energías solar térmica y fotovoltaica en el Perú**, Ministerio de Energía y Minas, <http://minagri.gob.pe/portal/>
- 9 INIA, 2010, **Papa INIA 316 – Roja Ayacuchana, Nueva variedad con resistencia a racha**, Dirección de Investigación Agraria, Estación Experimental Agraria Canaán – Ayacucho, [http://repositorio.inia.gob.pe/bitstream/inia/679/1/Trip-Papa\\_INIA316.pdf](http://repositorio.inia.gob.pe/bitstream/inia/679/1/Trip-Papa_INIA316.pdf)
- 10 Inostroza Juan et. al, 1984, **Botánica y Morfología de la Papa**, INIA Carillanca, <http://www2.inia.cl/medios/biblioteca/boletines/NR36476.pdf>
- 11 OSINERGMIN, 2018, **Centrales de Generación en Operación, Centrales Solares**, Organismo Superior de la Inversión en Energía y Minería, Fichas de las centrales solares, <http://www.osinergmin.gob.pe/>

- 12 Reidy G., 1986, Thermal properties of foods and methods of their determination. M.S. thesis food Sciences. Michigan state. USA. <https://es.slideshare.net/yuricomartinez/labo-1-propiedades-termofisicas-de-los-alimentos>
- 13 Roca José, 2017, **El periódico de la energía, Las 10 mayores plantas fotovoltaicas del mundo**, Anuarios de la energía, <https://elperiodicodelaenergia.com/>
- 14 SOLARGIS, 2017, **High-resolution solar data, Solar resource maps of Peru**, © 2018 Solargis, <https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/peru>
- 15 UNAM, **El Sol, nuestra estrella**, Revista Digital Universitaria, <http://www.revista.unam.mx/vol.10/num10/art67/int67-1.htm>
- 16 UNESA, **Funcionamiento de las centrales eléctricas: Central fotovoltaica**, Asociación Española de la Industria Eléctrica, <http://www.unesa.es/>

# ANEXO

## ANEXO 1. Diagrama Psicrométrico para la ciudad de Ayacucho



**ANEXO 2. Curvas de secado básico resultantes para cada ensayo desarrollado.**

Cód. Ens.	Características operativas	Curva de secado básico
E01	<p>CS1:CN:V1                      F = 4000 g                      %h<sub>inic</sub> = 77,1 %                      %h<sub>final</sub> = 10,2 %                      N = 4                      f<sub>c</sub> = 0,75 (75 %)                      T<sub>amb</sub> = 25,4 °C ±3,7                      T<sub>airecol</sub> = 55,5 °C ±5,1                      T<sub>airesec</sub> = 37,0 °C ±2,7                      t<sub>sec</sub> = 7h y 45 min</p>	<p><b>Humedad absoluta en el sólido: X</b> (kg<sub>agua</sub>/kg<sub>sol.seco</sub>)</p> <p><b>Temperatura del aire (°C)</b></p> <p>Legend:                      - T ambiente (blue diamonds)                      - T aire cal colector (red circles)                      - T aire húmedo secador (green circles)</p>

E02

CS1:CN:V2

F = 4000 g

%h<sub>inic</sub> = 78,2 %

%h<sub>final</sub> = 11,5 %

N = 4

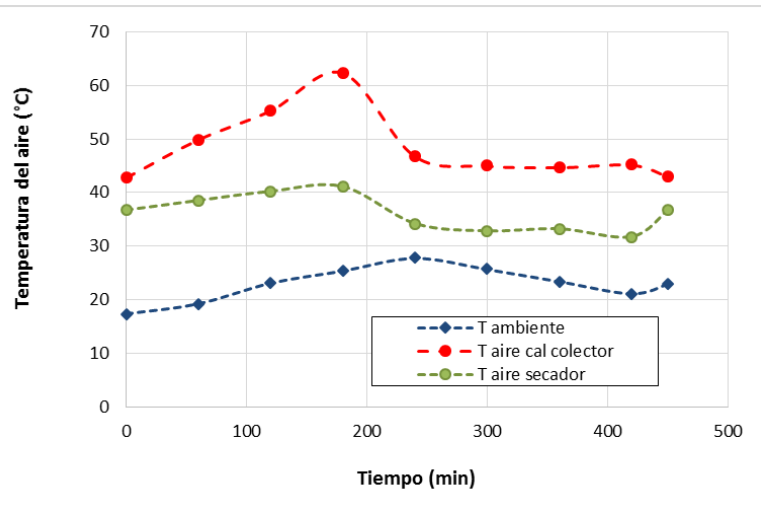
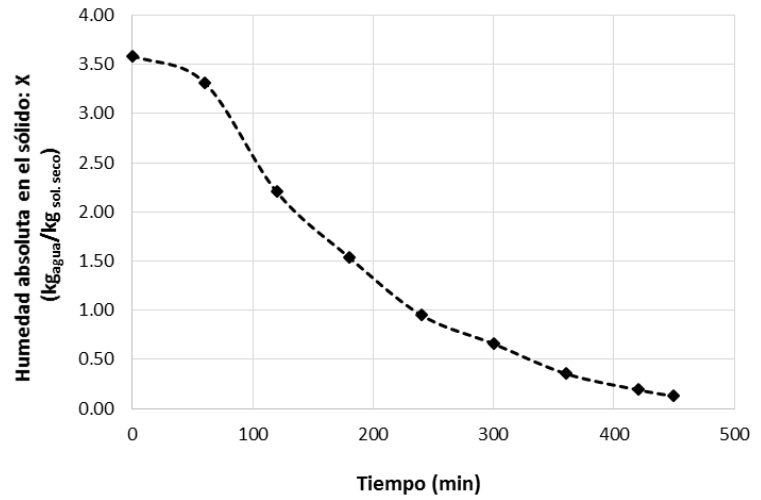
f<sub>c</sub> = 0,75 (75 %)

T<sub>amb</sub> = 22,9 °C ±3,3

T<sub>airecol</sub> = 48,3 °C ±6,6

T<sub>airesec</sub> = 36,1 °C ±3,4

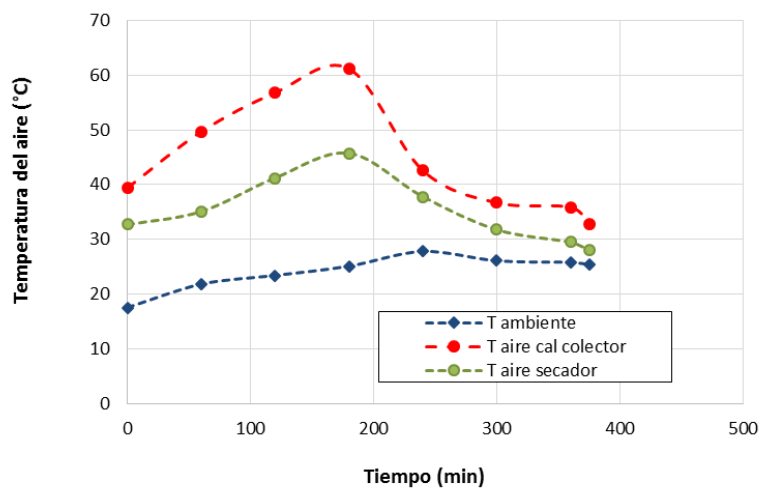
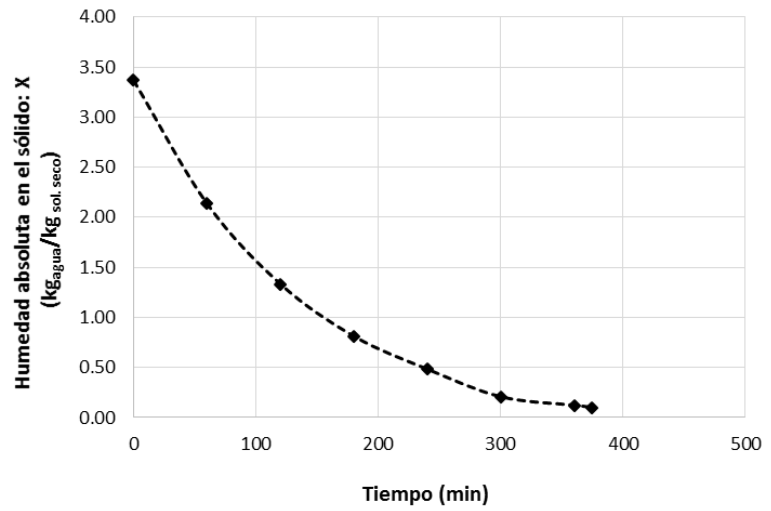
t<sub>sec</sub> = 7h y 30 min





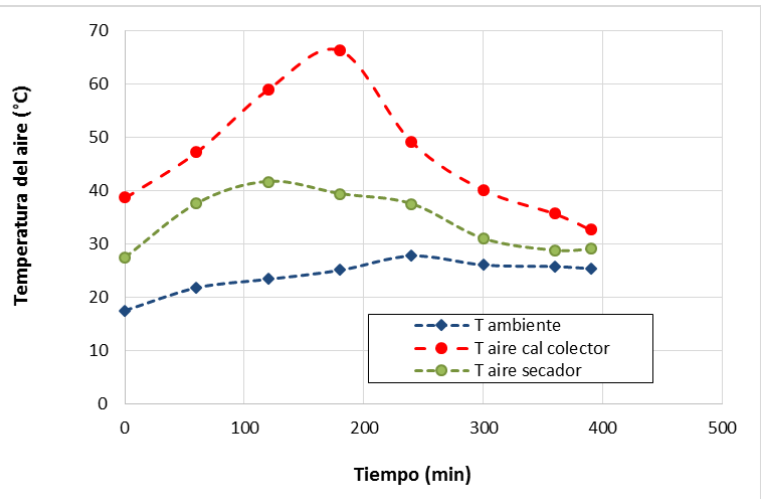
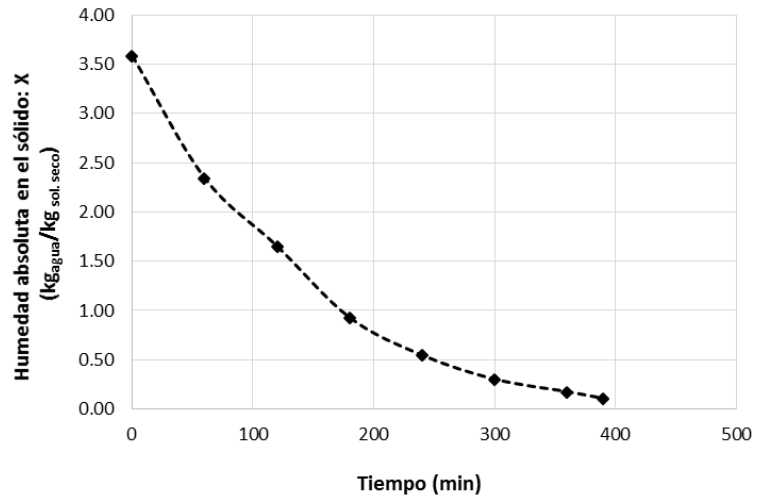
E03

CS1:CF:V1  
F = 4000 g  
%h<sub>inic</sub> = 77,1 %  
%h<sub>final</sub> = 11,5 %  
N = 4  
f<sub>c</sub> = 0,75 (75 %)  
T<sub>amb</sub> = 24,1 °C ±3,2  
T<sub>airecol</sub> = 44,4 °C ±10,4  
T<sub>airesec</sub> = 35,2 °C ±6,0  
t<sub>sec</sub> = 6h y 15 min  
V<sub>asc</sub> = 1,1 m/s ±0,1



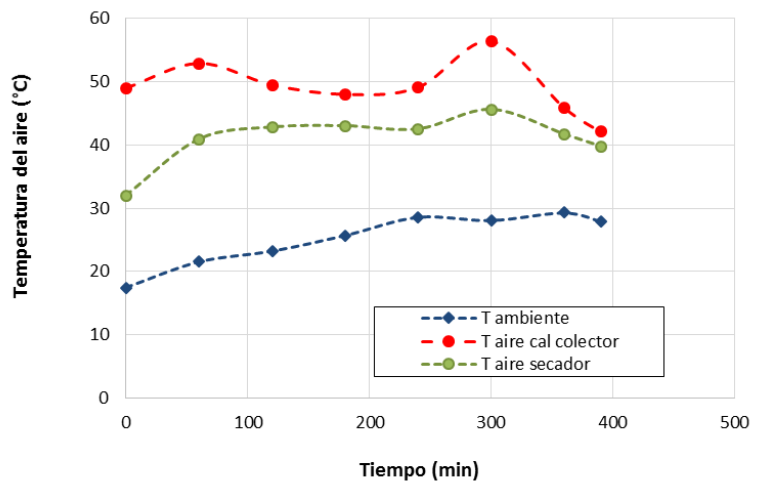
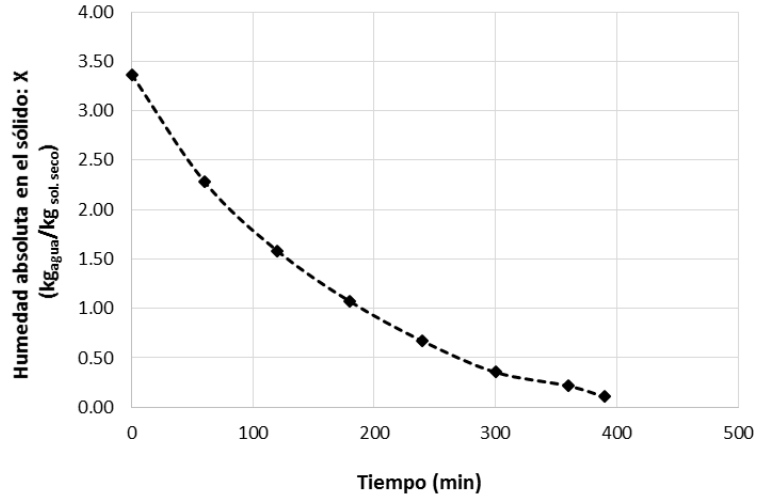
E04

CS1:CF:V2  
F = 4000 g  
%h<sub>inic</sub> = 78,2 %  
%h<sub>final</sub> = 9,4 %  
N = 4  
f<sub>c</sub> = 0,75 (75 %)  
T<sub>amb</sub> = 24,1 °C ±3,2  
T<sub>airecol</sub> = 46,2 °C ±11,8  
T<sub>airesec</sub> = 34,1 °C ±5,6  
t<sub>sec</sub> = 6h y 30 min  
V<sub>asc</sub> = 1,1 m/s ±0,1



E05

CS2:CN:V1  
F = 4000 g  
%h<sub>inic</sub> = 77,1 %  
%h<sub>final</sub> = 9,8 %  
N = 4  
fc = 0,75 (75 %)  
T<sub>amb</sub> = 25,2 °C ±4,2  
T<sub>airecol</sub> = 49,1 °C ±4,3  
T<sub>airesec</sub> = 41,0 °C ±4,0  
t<sub>sec</sub> = 6h y 30 min



E06

CS2:CN:V2

F = 4000 g

%h<sub>inic</sub> = 78,2 %

%h<sub>final</sub> = 10,1 %

N = 4

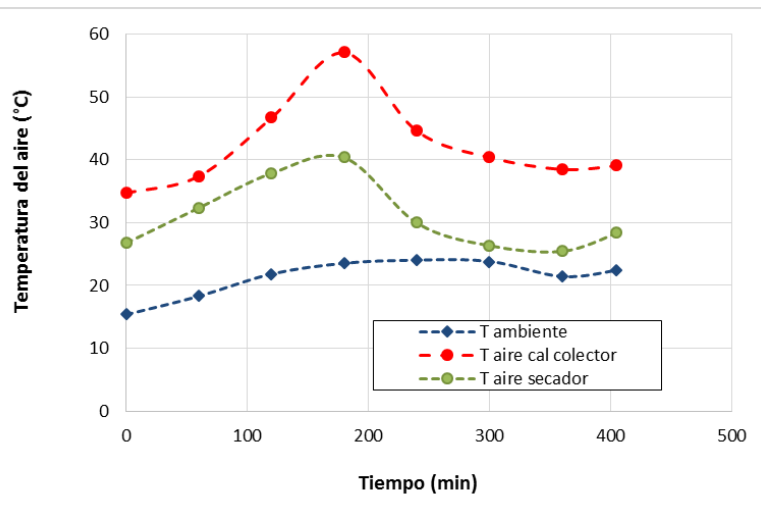
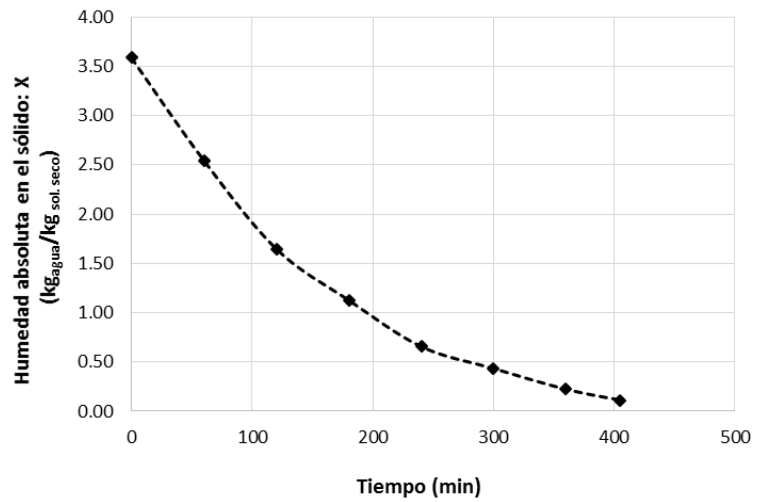
fc = 0,75 (75 %)

T<sub>amb</sub> = 21,3 °C ±3,0

T<sub>airecol</sub> = 42,3 °C ±7,1

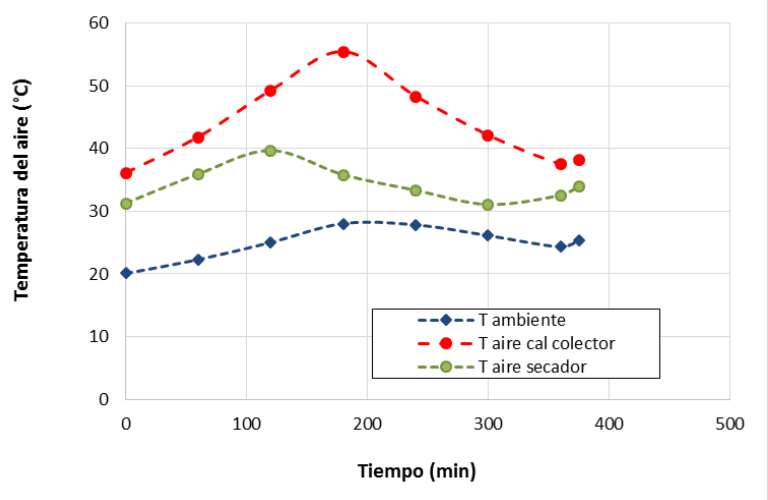
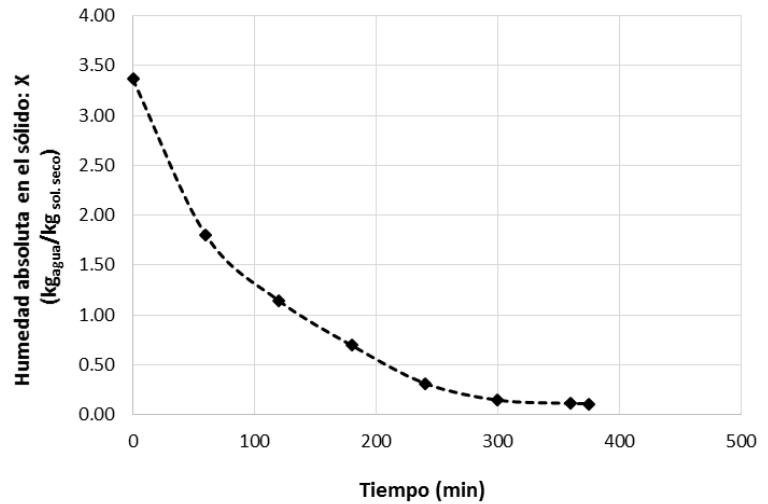
T<sub>airesec</sub> = 31,0 °C ±5,5

t<sub>sec</sub> = 6h y 45 min



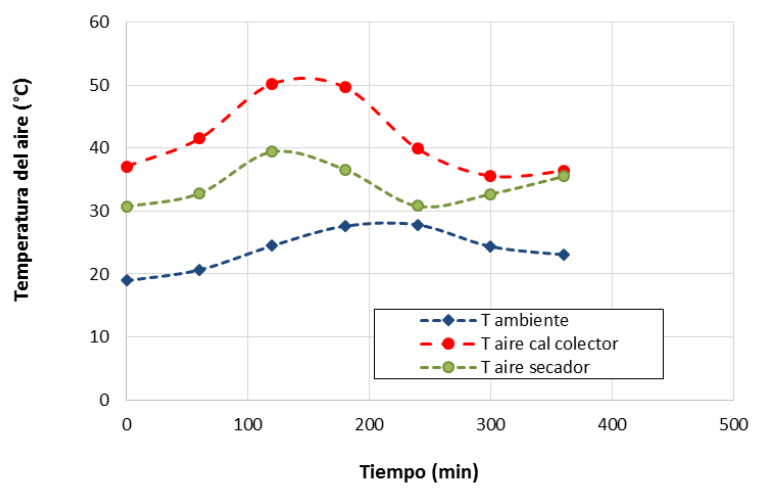
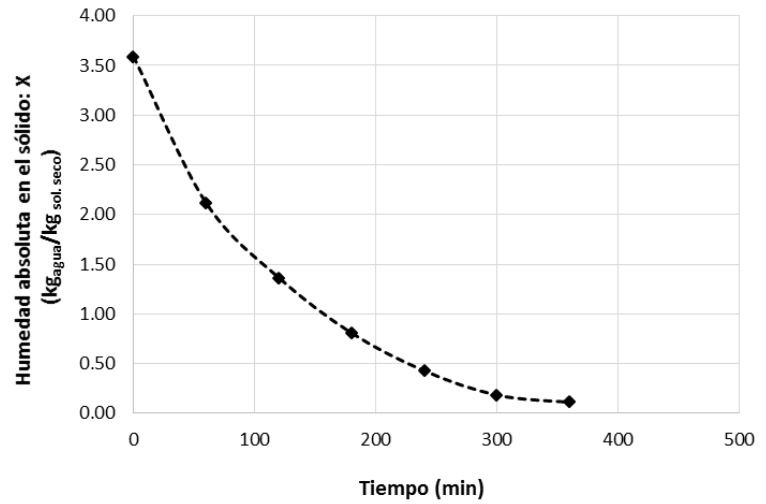
E07

CS2:CF:V1  
F = 4000 g  
%h<sub>inic</sub> = 77,1 %  
%h<sub>final</sub> = 9,8 %  
N = 4  
f<sub>c</sub> = 0,75 (75 %)  
T<sub>amb</sub> = 24,9 °C ±2,7  
T<sub>airecol</sub> = 43,6 °C ±6,8  
T<sub>airesec</sub> = 34,2 °C ±2,9  
t<sub>sec</sub> = 6h y 15 min  
V<sub>asc</sub> = 1,1 m/s ±0,1



E08

CS2:CF:V2  
F = 4000 g  
%h<sub>inic</sub> = 78,2 %  
%h<sub>final</sub> = 10,1 %  
N = 4  
f<sub>c</sub> = 0,75 (75 %)  
T<sub>amb</sub> = 23,9 °C ±3,3  
T<sub>airecol</sub> = 41,5 °C ±6,1  
T<sub>airesec</sub> = 34,1 °C ±3,2  
t<sub>sec</sub> = 6h y 00 min  
V<sub>asc</sub> = 1,1 m/s ±0,1



**ANEXO 3.**

**a) Vista fotográfica del Secador Solar del trabajo de Investigación**



**b) Vista fotográfica de la Cámara de Secado del Secador Solar del trabajo de Investigación**





#### **ANEXO 4. Cálculo del $f_c$ por el método de la cuadrícula.**

1. El cálculo de  $f_c$  es el cociente del área de la superficie de la papa extendida con vista en planta siendo su valor de  $(3\ 850 - 977,5)$   $\text{cm}^2$ , entre la extensión total de la bandeja cuya área es de  $3\ 850$   $\text{cm}^2$  para cada bandeja.

Área libre no cubierta por la papa (%)	cantidad de cuadrículas	Área de c/cuadrícula ( $\text{cm}^2$ )	Áreas parciales de las cuadrículas ( $\text{cm}^2$ )	Área libre no cubierta por la papa ( $\text{cm}^2$ )
100	11	25	275	275
90	2	25	50	45
80	3	25	75	60
70	5	25	125	87,5
60	7	25	175	105
50	3	25	75	37,5
40	6	25	150	60
30	17	25	425	127,5
20	21	25	525	105
10	30	25	750	75
0	49	25	1225	0
<b>TOTALES</b>			<b>3850</b>	<b>977,5</b>

2. El valor de  $f_c$  es:  $f_c = \frac{3\ 850 - 977,5}{3\ 850} * 100 = 74,61 \%$

3. Fotografía del método de la cuadrícula:



**ANEXO 5. Juego de fotos del proceso productivo y del Secador Solar**



