

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE CIENCIAS QUIMICAS Y FARMACIA
INSTITUTO DE NUTRICION DE CENTRO AMERICA Y PANAMA

EFFECTO DEL SECADO SOLAR NATURAL Y DEL SECADO INDIRECTO
MEDIANTE EL USO DE UN COLECTOR SOLAR DE PLACA PLANA
SOBRE EL ENDURECIMIENTO DEL FRIJOL (Phaseolus vulgaris)

Tesis elaborada por
MARIO ANTONIO PAREDES PAREDES
Previo a optar al grado de
MAESTRO
(Magister Scientifical)

CURSO DE POSTGRADO EN CIENCIAS Y TECNOLOGIA DE ALIMENTOS
CENTRO DE ESTUDIOS SUPERIORES EN NUTRICION Y CIENCIAS DE ALIMENTOS
(CESNA)

Guatemala, enero de 1983

INCAP T-368

PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
Biblioteca Central

DW
06
T(759)

JUNTA DIRECTIVA DE LA FACULTAD DE CIENCIAS QUIMICAS Y FARMACIA
DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

| | |
|---------------|---------------------------------|
| Decano | Dr. José Héctor Aguilar Arreola |
| Secretario | Lic. Leonel Carrillo Reeves |
| Vocal Primero | Lic. Luis Fernando Girón Rodos |
| Vocal Segundo | Lic. Francisco Monterroso S. |
| Vocal Tercero | Dr. Mario R. Molina |
| Vocal Cuarto | Dr. Sergio Molina Mejía |
| Vocal Quinto | Dr. Héctor Oliveros Pons |

GOMITE INTERINSTITUCIONAL DEL CESNA

| | |
|--|----------------------------|
| Director del CESNA | Dr. Luis Octavio Angel |
| Decano de la Facultad de Ciencias Médicas | Dr. Mario M. Cámara |
| Decano de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia | Dr. José Héctor Aguilar A. |
| Decano de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia | Dr. Luis F. Rosales |
| Director de la Escuela de Nutrición | Dr. Luis Octavio Angel |
| Director del Curso de Postgrado en Salud Pública con Enfoque en Nutrición y Materno-infantil | Dra. América de Fernández |
| Director del Curso de Postgrado en Bioquímica y Nutrición Humana | Dr. Oscar Pineda |
| Director del Curso de Postgrado en Ciencias y Tecnología de Alimentos | Dr. J. Edgar Braham |

COMITE ASESOR DE TESIS

Dr. Mario R. Molina

Dr. Ricardo Bressani

Dr. Luiz G. Elfas

Dr. Roberto Gómez Brenes

DEDICATORIA

A quienes idealizaron mis estudios

Dios

A la memoria de mi padre Delfín

A mi madre Delia María

A mis hermanos

Genia María, Ramiro Tomás, Humboldt Napoleón
y Bélgica Teresa

AGRADECIMIENTO

Al Dr. Mario Molina por la dirección acertada a la presente investigación,

**A los profesionales del Comité Asesor de Tesis:
Dr. Ricardo Bressani, Dr. Luiz G. Elfas y Dr. Roberto Gómez Brenes,**

Al Dr. Edgar Braham,

A los profesionales y personal técnico de la División de Ciencias Agrícolas y de Alimentos del INCAP,

Al Lic. Ricardo Sibrián,

A mis compañeros y amigos

RECONOCIMIENTO

A la Organización de los Estados Americanos (OEA)

Al Instituto de Nutrición de Centro América y Panamá
(INCAP)

A la Universidad Técnica de Ambato - Ecuador

Al Instituto Centroamericano de Investigación y Tecnología
Industrial (ICAITI)

Al Instituto de Sismología Vulcanología Meteorología e
Hidrología (INSIVUMEH)

Al Programa Título XII, Bean/Cowpea Program (CRSP)
Comunidad Económica Europea

CONTENIDO

| | | |
|-------|--------------------------------|----|
| I. | INTRODUCCION | 1 |
| II. | REVISION DE LITERATURA | 4 |
| III. | OBJETIVOS | 36 |
| IV. | TRASCENDENCIA DEL ESTUDIO | 37 |
| V. | MATERIALES Y METODOS | 39 |
| VI. | RESULTADOS | 50 |
| VII. | DISCUSION | 64 |
| VIII. | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 72 |
| IX. | RESUMEN | 74 |
| X. | BIBLIOGRAFIA | 76 |
| XI. | APENDICES | 82 |

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 CURVA DE SECADO: HUMEDAD EN BASE SECA EN FUNCION DEL TIEMPO DE SECADO. Secado de Frijol Carjlic al Natural días 1, 2 y 3-IX-82.
- Figura 2 CURVA DE SECADO: HUMEDAD EN BASE SECA EN FUNCION DEL TIEMPO DE SECADO. Secado de frijol Carjlic indirectamente con el uso del Colector Solar de Placa Plana días 1, 2 y 3-IX-82.
- Figura 3 CURVA DE SECADO: HUMEDAD EN BASE SECA EN FUNCION DEL TIEMPO DE SECADO. Secado de frijol Carjlic en horno días 4 y 5-IX-82.
- Figura 4 CURVA DE SECADO: HUMEDAD EN BASE SECA EN FUNCION DEL TIEMPO DE SECADO. Secado de frijol Carjlic al Natural días 14 y 15-X-82.
- Figura 5 CURVA DE SECADO: HUMEDAD EN BASE SECA EN FUNCION DEL TIEMPO DE SECADO. Secado de frijol Carjlic Indirectamente con el uso del Colector Solar de Placa Plana días 14 y 15-X-82.
- Figura 6 CURVA DE SECADO: HUMEDAD EN BASE SECA EN FUNCION DEL TIEMPO DE SECADO. Secado de frijol Carjlic al Natural días 20, 22 y 23-X-82.
- Figura 7 CURVA DE SECADO: HUMEDAD EN BASE SECA EN FUNCION DEL TIEMPO DE SECADO. Secado de frijol Carjlic Indirectamente con el uso del Colector Solar de Placa Plana días 20, 22 y 23-X-82.
- Figura 8 ANGULOS DE INCLINACION DE LOS REFLECTORES EN FUNCION DE LAS HORAS DEL DIA
- Figura 9 PORCENTAJE DE GRANOS ROTOS DE FRIJOL JUTIAPAN Y CARJLIC SEGUN TIEMPO DE COCCION (Regresión Ponderada de la Transformación Logística)

LISTA DE CUADROS

| | |
|-----------|--|
| CUADRO 1 | PRUEBAS DE SECADO SOLAR: PARAMETROS CONTROLADOS EN EL SECADO DE FRIJOL JUTIAPAN |
| CUADRO 2 | PRUEBAS DE SECADO SOLAR: PARAMETROS CONTROLADOS EN EL SECADO DE FRIJOL CARJLIC (DURANTE 3 DIAS) |
| CUADRO 3 | PRUEBAS DE SECADO SOLAR: PARAMETROS CONTROLADOS EN EL SECADO DE FRIJOL CARJLIC EN HORNO (DURANTE 2 DIAS) |
| CUADRO 4 | PRUEBAS DE SECADO SOLAR: PARAMETROS CONTROLADOS EN EL SECADO DE FRIJOL CARJLIC (DURANTE 2 DIAS) |
| CUADRO 5 | PRUEBAS DE SECADO SOLAR: PARAMETROS CONTROLADOS EN EL SECADO DE FRIJOL CARJLIC (DURANTE 3 DIAS) |
| CUADRO 6 | PRUEBAS DE SECADO SOLAR: RESUMEN DE VALORES DE HUMEDAD EN BASE SECA Y TIEMPO DE SECADO DE FRIJOL CARJLIC |
| CUADRO 7 | PRUEBAS DE SECADO SOLAR: CALCULO DE LA EFICIENCIA DEL COLECTOR SOLAR DE PLACA PLANA $E = \frac{M \cdot Cp \cdot \Delta T}{I_G \cdot A}$ |
| CUADRO 8 | PRUEBAS DE SECADO SOLAR: CALCULO DEL TIEMPO DE SECADO EN EL PERIODO DECAYENTE: $\frac{M - M_e}{M_o - M_e} = e^{-m(P_{vs} - P_v)^n \cdot t^q}$ |
| CUADRO 9 | PRUEBAS DE SECADO SOLAR: CALCULO DE LA EFICIENCIA DEL SECADO SOLAR INDIRECTO DE FRIJOL $E_s = \frac{L \cdot M \cdot 100}{E \cdot I_G \cdot A \cdot H}$ |
| CUADRO 10 | PRUEBAS DE SECADO SOLAR: VALORES DE EFICIENCIA DEL COLECTOR SOLAR DE PLACA PLANA CON REFLECTORES Y SIN REFLECTORES |
| CUADRO 11 | PRUEBAS DE SECADO SOLAR: ANGULOS DE INCLINACION DE REFLECTORES SOLARES A DIFERENTES DIAS Y HORAS |
| CUADRO 12 | ANALISIS FISICOS: COLOR DE GRANOS DE FRIJOL SECADOS AL SOL, INDIRECTAMENTE Y EN HORNO |
| CUADRO 13 | ANALISIS FISICOS: COLOR EN COTILEDON DOCIDO* DE FRIJOL SECADO: AL SOL, INDIRECTAMENTE Y EN HORNO |

- CUADRO 14 ANALISIS FISICOS: COLOR EN CALDO DE COCCION DE FRIJOL SECADO AL NATURAL, INDIRECTAMENTE Y EN HORNO
- CUADRO 15 ANALISIS FISICOS Y BIOLOGICOS: RESUMEN DE VALORES DE DUREZA Y NPR PARA LAS MUESTRAS DE FRIJOL
- CUADRO 16 ANALISIS FISICOS: TIEMPO DE COCCION EN FRIJOL SECADO AL NATURAL, INDIRECTAMENTE Y EN HORNO
- CUADRO 17 ANALISIS FISICOS: COEFICIENTES DE HIDRATACION (C.H.), PORCENTAJE DE ABSORCION DE AGUA (P.A.A.) Y PORCENTAJE DE CASCARA DURA* EN FRIJOL SECADO AL NATURAL, INDIRECTAMENTE Y EN HORNO
- CUADRO 18 ANALISIS QUIMICOS: HUMEDAD, TANINOS, ACTIVIDAD DE POLIFENOLOXIDASA (A.P.F.O.), INDICE DE SOLUBILIDAD DE NITROGENO (ISN) EN FRIJOL SECADO AL NATURAL, INDIRECTAMENTE MEDIANTE EL USO DEL COLECTOR SOLAR Y EN HORNO
- CUADRO 19 ANALISIS MICROBIOLOGICOS: PORCENTAJE DE GRANOS ANALIZADOS MICROBIOLOGICAMENTE EN FRIJOL SECADO AL NATURAL, INDIRECTAMENTE MEDIANTE EL COLECTOR SOLAR Y EN HORNO
- CUADRO 20 VALORES DE EFICIENCIA DEL COLECTOR SOLAR, TOMADAS A DIFERENTES LONGITUDES
- CUADRO 21 EVALUACION DE IGUALDAD DE VARIANZAS A DISTINTAS EFICIENCIAS, USANDO LA TENDENCIA DE BOX (BARTLETT). DATOS ORIGINALES EXCLUYENDO ESTROPAJO PIN Y FLUJO DE 0.40 m³/min
- CUADRO 22 EFICIENCIA OBTENIDA MEDIANTE EL EFECTO DE CON Y SIN ESTROPAJO, ANGULOS DE INCLINACION 0° - 24.61° Y FLUJOS DE AIRE DE 0.40 Y 2.22 m³/min.

I. INTRODUCCION

El presente siglo se caracteriza por la "explosión de población". Entre 1400 y 1900, el ritmo de aumento creció lentamente, mientras que en la actualidad la población mundial está aumentando en un 2.0% anual como promedio. Esto significa aproximadamente 8,000 personas más cada hora (11), lo que plantea problemas graves de tipo alimentario-energético.

A la luz de los conocimientos actuales sobre alimentos, sabemos que el frijol es una leguminosa de alto contenido proteínico, mas el aprovechamiento por parte del organismo humano es bajo, debido a la presencia de factores antinutricionales. Como uno de éstos se ha citado últimamente el caso de los polifenoles que se ubican en la testa o cáscara del grano.

El realizar nuevas investigaciones en este campo está justificado toda vez que el frijol constituye un alimento básico de la mayoría de los países latinoamericanos tanto de las zonas urbanas como rurales, especialmente de los grupos sociales que no tienen acceso a las proteínas de origen animal.

Diversas encuestas realizadas por el INCAP ponen de manifiesto que el frijol secado bajo la acción directa de los rayos solares, presenta un grado de endurecimiento acelerado (41). Este factor contribuye a incrementar el tiempo de cocción del grano y, consecuentemente, el uso de

energía para cocción, lo que es una causa de rechazo del grano por el consumidor. Esto último aumenta las pérdidas postcosecha, en vista de que el consumidor y el industrial rechazan dicho grano endurecido.

Conscientes de lo expuesto, es necesario investigar el efecto que un secado directo al sol del frijol tiene sobre la calidad del grano, así como determinar si existirían ventajas en aplicar un secado solar de tipo indirecto para esta leguminosa. También resulta de interés conocer el posible efecto que una exposición directa al sol puede tener sobre los polifenoles del grano de frijol, y su posible implicación en el proceso detrimental de la calidad del mismo.

El uso de un colector solar para el secado solar indirecto se considera como una alternativa viable para el procesamiento postcosecha del frijol. El uso de la energía solar puede considerarse adecuado dado que los países latinoamericanos en desarrollo se encuentran dentro del amplio "cinturón solar" entre los 40° de latitud norte y/o sur, dentro del cual hay gran disponibilidad de energía solar, energía que es gratuita, inagotable, omnipresente y no plantea problemas de transporte ni distribución, además de que no contamina el ambiente.

Varios productos alimenticios tales como frutas, verduras, cereales, granos, carne y pescado, se secan utilizando técnicas sencillas de secado al sol (60). Con el adelanto tecnológico, la construcción de colectores solares de diferentes tipos, está sustituyendo en gran parte el tradicional secado al sol por exposición directa, con el objeto de mejorar el control de calidad, reducir el desperdicio y eliminar pérdidas e

ineficiencias surgidas de las dificultades que se presentan al secar un alimento al sol directamente.

En base a esta introducción, la ejecución de esta investigación tiene un enfoque dirigido a evaluar el efecto de los tratamientos de secado solar (natural e indirecto) sobre el endurecimiento del frijol común, así como sobre la naturaleza química de sus polifenoles.

II. REVISION DE LITERATURA

A. Importancia del Frijol en la Dieta Latinoamericana

Entre los alimentos de consumo común, las leguminosas constituyen la fuente más barata de proteínas. A pesar de que es difícil estimar su producción con exactitud, se puede calcular que la producción de proteína derivada de leguminosas, por hectárea, es 10 veces mayor que la de la carne, 5 veces más alta que la de la leche, y el doble de la que aportan los cereales, salvo el maíz. Sin embargo, los requerimientos de inversión de capital para producir una cantidad de cereales que en términos de proteínas equivalga a una cantidad semejante de leguminosas son similares, si bien esa misma cantidad de cereales aporta un mayor número de calorías que las provenientes de leguminosas. Esta situación explica por qué en los países en vías de desarrollo, más que en los industrializados, el único renglón alimenticio que se consume en mayores cantidades per cápita es el de las leguminosas. Entre los países latinoamericanos, sólo Argentina y Uruguay tienen un consumo bajo de granos, siendo la carne de mayor consumo en su dieta (43).

Según Jaffé (43), se considera al frijol (Phaseolus vulgaris) como la leguminosa de mayor consumo en nuestro continente, cuya forma ancestral (Phaseolus aborigineus) se ha encontrado desde Argentina hasta los Andes venezolanos y en ciertos países de Centro América. En numerosas tumbas precolombinas del Perú se descubrieron frijoles negros muy parecidos a los que se cultivan hoy día. La popularidad de las variedades negras se

reduce principalmente a la región norte del área latinoamericana, desde México hasta el norte del Brasil, mientras que en otras partes del mundo se prefieren las variedades o cultivares blancos, rojos o moteados. El total de los cultivares de esta especie existentes en la actualidad excede 1,000, y se distinguen entre sí no sólo por la forma y el color de la semilla, sino también por su composición química y por los factores proteínicos que contienen.

Bressani (8) en uno de sus trabajos expone que en Guatemala los niños menores de 2 años de edad ya toman caldo de frijol en biberón, lo que significa que desde temprana edad esta leguminosa es considerada como alimento básico.

B. Características Químico-Nutricionales del Frijol

Muchos investigadores han demostrado que de acuerdo a su composición química, las leguminosas de grano poseen un alto valor nutricional comparado con otros granos que intervienen en la nutrición humana (38).

Según Elías y col. los valores de contenido proteínico para frijol común oscilan de 20.6 a 26.0%, los de grasa entre 1.4 y 1.9%, fibra cruda entre 3.5 y 4.7% y un contenido de humedad en el rango de 10.3 a 11.8%. Otras investigaciones demuestran que el frijol es rico en vitaminas del complejo B, siendo una fuente importante de tiamina, riboflavina y nicotina (1, 22).

Entre los aminoácidos esenciales, el contenido de leucina y triptofano en el frijol es bajo, y existe una marcada deficiencia en metionina.

En investigaciones realizadas en países latinoamericanos, se ha determinado que el contenido de aminoácidos varía en variedades de la misma especie de frijol (1, 43).

Elías y col. (21) manifiestan que el frijol presenta un alto valor de aminoácidos esenciales, mas al ser comparados con el patrón de la FAO, se confirmó que esta proteína es deficiente en metionina y cistina, siendo estos aminoácidos azufrados los más limitantes seguidos por la leucina y el triptofano. El contenido de lisina es superior al valor expuesto, por el patrón de FAO, constituyendo esta proteína un potencial de complementación con proteínas de cereales, las cuales son deficitarias en este aminoácido. Su digestibilidad está alrededor del 75% (69).

C. Factores Antinutricionales del Frijol

Al igual que otras leguminosas de grano, el frijol común contiene factores de acción antifisiológica como inhibidores de tripsina, proteínas tóxicas como la fasina (especialmente en el frijol negro), hemaglutininas, factores de flatulencia, inhibidores de amilasa, glucósidos cianogénicos, factores causantes de latirismo, favismo y, posiblemente, los polifenoles. Muchos de ellos son destruidos principalmente por la acción del calor (proceso de cocción) usado para el consumo del frijol, no así los polifenoles que pueden interferir con la utilización de los nutrientes del frijol (20, 69).

D. Polifenoles

1. Generalidades

Los tejidos de las plantas presentan una amplia gama de compuestos fenólicos de diversos tipos presentes en diferentes concentraciones.

Por otra parte, los taninos, tan abundantes en alimentos vegetales, son poli-hidroxi-fenoles de diferente peso molecular (entre 500 y 3,000), cuya habilidad para formar complejos y precipitar proteínas es no solo de importancia en el metabolismo de las plantas superiores, sino en muchos aspectos de la tecnología de alimentos (31). Se pueden distinguir entre los fácilmente hidrolizables en medio ácido a ácido gálico y los taninos condensados que por calentamiento con ácido diluido o aun con agua originan productos de condensación macromoleculares insolubles llamados flobafenos, de color rojo pardo. A los precursores de taninos condensados pertenece el favonoide catequina o penta-hidroxi-flavano que resulta también de la hidrogenación catalítica de la quercetina o del cianidol (69).

Los taninos son importantes por producir astringencia que influencia el sabor y contribuye a que la gente tome gusto a tal alimento. Su función exacta no es clara y aunque se les atribuye funciones repelentes de insectos y microorganismos, básicamente actuarían inhibiendo las enzimas extracelulares de los parásitos, impidiendo así el ataque al tejido vegetal (27, 34). Estudios de Bressani y Elías (9) manifiestan que el papel de los polifenoles en las leguminosas no está claro. *Phaseolus vulgaris* blanco, negro y rojo contienen 0.34-0.42; 0.57-1.15 y 0.95-1.29% respectivamente. El mayor porcentaje se halla en su testa así: 1.30, 42.50 y 38.00 para el frijol blanco, negro y rojo respectivamente.

Positivamente se menciona a los polifenoles como factores que influyen la germinación del grano, protegen de la acción destructora de insectos y puede que desempeñen un papel en el sabor del frijol, parámetro

importante desde el punto de vista de aceptabilidad del consumidor (20, 64).

Según conclusión de Bressani y col (20) los polifenoles pueden ser eliminados del frijol por medios genéticos; sin embargo, es necesario establecer el verdadero papel que desempeñan en el valor nutricional del frijol.

Estudios llevados a cabo en humanos y animales parecen indicar que las testas de frijoles coloreados, especialmente rojos y negros, poseen compuestos polifenólicos que interfieren con la utilización biológica de las proteínas, mas el verdadero modo de actuar no está aún completamente determinado, debido principalmente: 1) al gran número de ellos presentes en las semillas; 2) a la falta de una metodología analítica específica para conocer exactamente el tipo y la cantidad de polifenoles presentes en cada variedad; y 3) al efecto que pueda tener sobre ellos el procesamiento a que se someten las semillas previo a su consumo (28).

E. Endurecimiento del Frijol

Estudios de Gloyser (27) indican que el uso de temperaturas altas y humedades relativas bajas durante el almacenamiento del frijol dan lugar a un efecto denominado "cáscara dura", prolongando el tiempo normal de cocción.

Trabajos de Morris y Wood (59), ponen de relieve que un frijol con un contenido de humedad mayor de 13%, tiende a sufrir cambios en la textura y sabor cuando es almacenado por 6 meses a 25°C.

Según Ruiloba (67), hay un efecto notable de la humedad del grano, encontrado que a valores altos se necesita un tiempo de cocción 4 veces más que para el frijol inicial, y este valor se reduce a medida que disminuye la humedad. Asimismo, este autor dice que no existe una relación entre la dureza del grano y el valor nutritivo.

Independiente de la variedad, el contenido de catequina y la actividad de la polifenoloxidasas se ven afectados por las mismas condiciones que favorecen el proceso de endurecimiento del frijol, tales como la humedad del grano, la temperatura y el tiempo de almacenamiento; dicho efecto se tradujo en una disminución en el contenido de catequina y un aumento en la actividad de la polifenoloxidasas (PFO), en las condiciones que son propicias para el desarrollo del fenómeno de la dureza del frijol (1).

Se dice que existe una asociación entre la duración del tiempo de cocción, dureza de la semilla y este último fenómeno a la menor capacidad de absorción de agua por parte de la semilla, significando que el tiempo de cocción debe estar correlacionado positivamente con la dureza y negativamente con la capacidad de absorción de agua (1).

Concluye Alcahé (1) que la disminución en el contenido de polifenoles, expresados como equivalentes de catequina, se debe a una reacción de naturaleza enzimática, catalizada por la polifenoloxidasas, y que el mecanismo de endurecimiento de la semilla puede estar en parte influenciado por un proceso de polimerización de los fenoles presentes en la testa de la misma.

Según Bressani y col. (10), el deterioro físico más evidente del frijol durante su almacenaje es su endurecimiento, el que generalmente se manifiesta por un aumento en el tiempo de cocción del frijol. Este fenómeno tiene repercusiones de orden tecnológico y económico.

F. Posibles Teorías de las Causas del Endurecimiento del Frijol

Existen en la actualidad varias hipótesis presentadas por diversos autores. Estas hipótesis tratan de establecer la relación entre la dureza del grano y otros componentes del frijol. Los mecanismos planteados en las hipótesis no han sido probados o respaldados por datos experimentales.

- Takayama y col. (72), aseguran que la dureza está muy relacionada con la composición de la fracción lipídica del frijol (aunque presenta cantidades bajas las que contienen ácidos grasos insaturados como palmítico y linoleico los que pueden sufrir una peroxidación alterando la permeabilidad del cotiledón y afectando así el tiempo de cocción del grano).
- Kon (47) relaciona la dureza con el cambio en las sustancias pécticas. Estos heteropolisacáridos pueden formar complejos insolubles con iones divalentes, disminuyendo la permeabilidad del grano.
- Lolas y Markakis (50), sugieren que el endurecimiento puede deberse a la acción de la enzima fitasa y a la liberación de iones de calcio que se produce a consecuencia de esta acción.

- Mattson (52) lo relaciona con el contenido de ácido fítico y iones de calcio y magnesio. Sugiere que cuando el contenido de ácido fítico es bajo, la pectina que se encuentra en la mitad de la lamella forma pectato insoluble de calcio y magnesio, incrementando el tiempo de cocción.
- Hellerdon (36) considera la degradación del almidón en los frijoles precocidos. Durante este fenómeno el almidón soluble producido en la precocción disminuye debido a una asociación de las moléculas del mismo y, probablemente, por enlaces de hidrógeno, ya sea en forma directa o a través de moléculas de agua enlazándose entre los sitios activos de las moléculas de almidón. Como consecuencia de este fenómeno no sólo aumenta la resistencia del almidón a la hidrólisis por las enzimas amilolíticas, sino también su capacidad de hidratación se ve disminuida.
- Mejía (55) involucra el metabolismo de compuestos fenólicos. La hipótesis que este autor formula es la acción de la polifenoloxidasa sobre los compuestos fenólicos presentes en la cubierta de las semillas, los cuales afectan la permeabilidad de ésta durante su almacenamiento; posiblemente se originan complejos.
- Molina y col. (58) asocian la formación de complejos de proteína con compuestos fenólicos. Las estructuras fenólicas reaccionan con las proteínas formando un complejo insoluble. Manifiestan una correlación positiva entre el contenido de proteína lignificada del cotiledón del grano y el tiempo de cocción del frijol.

- En la hipótesis planteada por Molina y col. (58), es posible la acción de sistemas enzimáticos que actúan a nivel de la semilla lo cual origina su endurecimiento.

Como se puede apreciar, hasta el momento ninguna hipótesis ha planteado alguna posible influencia del método a emplearse en el secado del grano sobre el grado de endurecimiento durante el almacenaje. Por lo mismo, parece de interés definir si una exposición directa al sol del grano de frijol tiene alguna influencia sobre tal fenómeno.

G. Fotoquímica

Las reacciones que pueden efectuarse por absorción de energía luminosa se conocen como reacciones fotoquímicas (51). La energía lumínica influye en la velocidad de muchas reacciones de síntesis, descomposición, hidrólisis, reducción, oxidación, polimerización y cambios isoméricos. En numerosos casos pequeñas cantidades de luz producen resultados sorprendentes.

Ciertas reacciones se llevan a cabo sólo en presencia de la luz, y otras requieren la energía lumínica si se han de efectuar a una velocidad apreciable (14).

La mayor parte de las reacciones fotoquímicas responden únicamente a la luz ultravioleta y a la visible, puesto que la luz de longitud de onda mayor en el infrarrojo no tiene energía de suficiente intensidad para producir actividad química. Por tanto, menos de la mitad de la radiación solar es utilizable en la conversión fotoquímica.

La energía de activación varía usualmente entre 10^4 a 10^5 cal/mol. Las reacciones que requieren menos energía son extremadamente rápidas y las que requieren más, extremadamente lentas, incluso a altas temperaturas (16).

Como regla aproximada la mayor parte de las reacciones químicas a temperaturas próximas a la del ambiente duplican o triplican su velocidad con una alza de temperatura de 10° , porque el número de choques violentos crece exponencialmente (16).

Por lo acotado, se piensa que una exposición del frijol a la acción directa de la energía solar, puede incidir sobre éste motivando una serie de reacciones químicas entre los diferentes componentes del frijol, dando lugar a su posible endurecimiento.

H. Secado

1. Generalidades

El secado mediante el sol directo constituye en algunos lugares del mundo y para determinados productos el método más económico, sin embargo, presenta varios inconvenientes como son: depender de factores ambientales incontrolables, ser lento dando lugar a contaminaciones, requerir áreas grandes para secado, generalmente no reduce el contenido de humedad en algunos productos a menos de 15%, lo cual, en un gran número de productos, es insuficiente para permitir la estabilidad en el almacenamiento (61).

2. Optimización de Variables

En el secado es necesario optimizar o equilibrar los parámetros de este proceso a fin de tener una máxima velocidad de secado con el mínimo daño en el alimento en sí y al costo más bajo.

En los secadores de aire por convección forzada, la velocidad y el volumen del aire afectan la rapidez del secado (61).

Se puede calentar el aire directa e indirectamente. En el primer caso el aire está en contacto directo con una flama o gases y este aire se contamina con partículas que pueden ser transferidas al alimento en detrimento de su calidad. En el segundo caso el aire se pone en contacto con una superficie caliente dejándolo libre de contaminación.

Con este trabajo se espera utilizar una fuente energética inagotable, que no presenta problemas de contaminación ambiental y es gratuita, para el calentamiento del fluido secador (aire) en el secado solar indirecto del frijol a una temperatura baja a fin de que la calidad de este grano durante su almacenamiento no se vea afectada negativamente por el proceso de secado usado.

I. El Sol y el Secado Solar

1. Generalidades

El sol es una estrella que brilla por su propia luz, se halla próximo a la tierra a una distancia de 1.5×10^8 de Km., su diámetro es de 1,392,428 Km. con una masa aproximadamente de 2 mil billones de billones de toneladas. El sol es un elemento insignificante de las estrellas

de la llamada Secuencia Principal. Pertenece a la categoría de estrellas "amarillas enanas", de tipo espectral dG. Estas estrellas, al igual que las demás, se supone fueron formadas a partir de una tenue nube de gas y mediante procesos de Aglomeración en Frío (11, 19, 23, 74).

Las partes del sol accesibles a la observación son la fotosfera, la cromósfera y la corona, que constituyen la atmósfera solar. La fotosfera, forma el disco aparente del astro y emite la casi totalidad de la luz solar, es una capa de varios centenares de kilómetros, que se caracteriza por su espectro continuo (19, 24).

El interior del sol lo constituyen capas de gases, de los cuales el más abundante es el hidrógeno que constituye el 80% de la materia solar y el resto en casi su totalidad es helio (11). En las proximidades del centro del sol, se calcula que la temperatura está entre 8×10^6 y 40×10^6 °K y en su superficie visible la temperatura es de 5,762°K aproximadamente, temperatura suficiente alta para que los átomos se encuentren en su estado de gran excitación, mas lo suficientemente baja para que en forma ocasional adopten las configuraciones atómicas conocidas en la tierra (11). La rotación del sol en torno a su propio eje dura unos 25 días (23).

La masa del sol disminuye a la sorprendente velocidad de cuatro millones de toneladas por segundo, no obstante por su tamaño se supone que puede continuar en el estado actual durante varios miles de millones de años (11, 33).

2. Radiación Solar

Las radiaciones nucleares, origen de la radiación solar, se producen en un núcleo central. Todas las radiaciones electromagnéticas tienen un carácter análogo, diferenciándose sólo en su longitud de onda. A medida que las radiaciones gamma originadas en el centro del sol, se alejan de él, chocan con núcleos o con electrones, o son desviadas cuando la colisión no se llega a producir. En cada uno de estos fenómenos, parte de la energía pasa a las partículas con las que choca, y los fotones resultantes al tener menor energía que antes, tendrá una longitud de onda mayor. Pronto la radiación gamma se debilita, convirtiéndose en rayos X. Cerca de la superficie del sol, donde la temperatura ha disminuido lo suficiente para que puedan existir átomos enteros, hay otro mecanismo por el que se debilita la radiación, en el cual el fotón al chocar, hace que un electrón, al volver de este estado de excitación a su lugar normal, desprende energía también de radiación de una frecuencia característica. La radiación que sale del sol y llega al espacio, se distribuye en una amplia serie de longitudes de onda entre unos 0.25 micrones y 3 micrones; más o menos el 9% se encuentra en la región ultravioleta, 40% en la luz visible y el 51% está formado por ondas infrarrojas o largas (11, 33).

La distribución de la energía es muy similar a la del clásico "cuerpo negro", para una temperatura de 5500°C (11); consideración hecha especialmente al referirse a procesos térmicos. La radiación viaja con una velocidad de 3×10^8 m/s, tomando aproximadamente 8 minutos para alcanzar la atmósfera terrestre.

2.1 La Constante Solar

La constante solar (I_{sc}), es un término que define la relación con la cual la radiación solar incide fuera de la atmósfera y alrededor de la tierra en una unidad de área normal a los rayos solares, su valor es de $1.94 \text{ cal. cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ o $1.94 \text{ langleys/min}$, 1.353 Kw/m^2 , 1.81 HP/m^2 . Esta constante representa la máxima energía solar disponible para uso en la tierra (16, 46, 54, 56).

La radiación solar se acostumbra a medir en langleys por minuto. Un langley vale 1 caloría de energía por cm^2 . La intensidad varía de acuerdo con el lugar, hora, estación, nubosidad y contenido de polvo en la atmósfera de 0 hasta $1.5 \text{ cal/cm}^2 \text{ min}$ (16).

3. Tiempo y Posición del Sol

La intensidad de la radiación solar (I_s) a un tiempo, lugar y ángulo de la superficie sobre la cual chocan los rayos solares depende de la posición en el cielo, estación del año, grado de nubosidad y el ángulo de la superficie con respecto a la horizontal (ángulo de inclinación). La posición del sol es definida por su altitud sobre el horizonte, la cual en términos científicos se representa por la letra beta o B y por su azimuth A (56).

Para comprender mejor la posición del sol y la variación de los rayos solares incidentes sobre la superficie de un colector solar, es necesario definir algunos ángulos y su forma de cálculo (11, 46, 56).

3.1 Angulo de declinación (D)

Es el ángulo formado entre un vector paralelo a los rayos solares y la proyección de éste sobre el plano ecuatorial.

El eje de la tierra tiene una inclinación angular constante $\pm 23^{\circ} 27'$ con relación al plano de rotación (54). El aparente movimiento diario del sol a través del firmamento mirando desde cualquier localización de la tierra varía cíclicamente día a día durante todo el año, al referirse al paralelo 0° o Ecuador será $+ 23.45^{\circ}$ el 21 de junio, -23.45° el 21 de diciembre, 0° el 21 de marzo y 21 de septiembre; las dos primeras fechas corresponden a los solsticios y las dos finales a los equinoccios (40, 42).

El ángulo de declinación D, puede ser calculado con gran aproximación con la ecuación de Cooper (1969):

$$D = 23.45 \cdot \text{sen} \left[360 \cdot \frac{284 + n}{365} \right]$$

Donde n es el día del año.

3.2 Latitud (L)

Es el ángulo entre el plano ecuatorial de la tierra y una línea que va desde el centro de la tierra al sitio de estudio, es + - al norte del Ecuador y - al sur del Ecuador; sus valores pueden obtener de un atlas.

3.3 Angulo horario del sol (H)

Es el arco barrido por el sol cada hora, al mediodía es 0° , y cada hora equivale a 15° de longitud con valores + y - a la mañana y a la tarde respectivamente.

$$H = tx 15^\circ$$

donde t es el tiempo en horas, antes o después del mediodía.

3.4 Angulo de inclinación (T)

Es el ángulo formado entre la horizontal y la superficie del colector, puede variar entre 0° y 90°

4. Radiación directa, difusa y global

La disponibilidad de energía solar en cualquier parte del mundo puede ser estimada por dos métodos. El primero involucra medidas de un aparato que registra la radiación solar y el segundo se basa en el uso de fórmulas físicas y constantes. La radiación solar directa, I, es el flujo de radiación solar asociada con los rayos solares directos desde la dirección del disco solar sin cambio de sentido. La radiación difusa, I_d , alcanza la tierra desde el resto del total del hemisferio celeste desde el cual han sido dispersadas y reflejadas en tránsito a través de la atmósfera. Radiación global I_G , incluye toda la radiación directa y difusa, incidente sobre un plano horizontal (11, 19).

4.1 Instrumentos de medida de la radiación solar

La radiación solar en un momento dado se puede estimar

aproximadamente a partir de la constante solar 2.0 cal/cm^2 min en el borde exterior de la atmósfera terrestre, en el supuesto que se hagan las correcciones necesarias según ángulo, absorción y dispersión en la atmósfera de los rayos solares (54). Los observatorios registran diariamente la radiación solar total o global, en una superficie horizontal.

Entre los instrumentos principales de medida de la radiación solar se pueden mencionar el piroheliómetro "Appley", actinómetros, actinógrafos, solarímetro Moll Goczynaki, medidor bimetalico Robitzsch, instrumento de destilación Bellani, lente esférica Campbell-Stokes, etc. (16, 19, 46).

4.4.1 Registro de la radiación solar en Guatemala

Guatemala cuenta con el Instituto de Sismología Vulcanología Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH), Instituto que dispone de los instrumentos para el registro de las variaciones diarias de la radiación solar y de la insolación diaria (horas-sol). Los aparatos de medida lo constituyen un actinógrafo Fuess 58C y un heliógrafo Campbell-Stokes. Estos aparatos miden únicamente la radiación global, incidiendo completamente sobre un plano horizontal. Los piranómetros detectan la radiación mientras que los piranógrafos registran sus variaciones generalmente en forma gráfica (68).

4.2 Relación entre la radiación global recibida en una superficie horizontal y superficie inclinada

Según lo expuesto, los observatorios meteorológicos normalmente nos dan el valor de la radiación global incidente en una superficie horizontal, la que es necesario multiplicarla por la relación de la radiación recibida en el receptor inclinado a la obtenida en la horizontal. Esta relación se puede calcular a partir del coseno del ángulo de incidencia para la radiación directa, pero no para la difusa. El mejor cálculo resulta mediante un medidor de radiación solar inclinado al mismo ángulo que el colector solar.

Según (19) los colectores solares de placa plana absorben la radiación directa y la difusa y es necesario derivar un valor de R para la radiación total solar. La corrección angular es sobre la radiación directa. La corrección para la radiación difusa depende de la distribución de ésta en el cielo, la cual generalmente no se conoce; esta distribución depende particularmente de las nubes y otros componentes atmosféricos que determinan su difusibilidad. También, algo de la radiación puede ser reflejada por la superficie de la tierra. Para un cálculo se puede asumir que la mayoría de la radiación difusa nos llega de un origen aparente cercano al sol; esta consideración es mejor cuando el día está despejado. El factor de corrección angular aplicado para la componente difusa es esencialmente la misma

que para la directa, y la radiación global se considera como radiación directa y arribando a la siguiente fórmula:

$$R = R_b = \frac{\cos(L-T) \cdot \cos D \cdot \cos H + \sin(L-T) \cdot \sin D}{\cos L \cdot \cos D \cdot \cos H + \sin L \cdot \sin D} \quad (19)$$

En esta investigación por no disponer del medidor de energía solar que permita medir ésta a cualquier ángulo de inclinación, nos valemos de la fórmula anterior para ángulos diferentes a 0° y en el caso de 0° tomamos para los cálculos los valores de las gráficas de radiación del actinógrafo del INSIVUMEH.

5. Captación de la energía solar

Un objeto al sol se calienta porque absorbe parte de la energía que transporta la radiación solar. Son muchos los mecanismos por los cuales se produce este fenómeno y en parte se puede explicar mediante la Teoría Cuántica y la Mecánica Ondulatoria de la luz, teorías que no las profundizaremos en esta investigación, ya que escapan a la filosofía de la misma.

Para la mayoría de las aplicaciones de la energía solar, toma importancia solamente la radiación térmica. Esta radiación térmica es emitida por los cuerpos en virtud de su temperatura; los átomos, moléculas, o electrones son elevados a estado de excitación, retornan espontáneamente a estados de energía bajos, y emiten energía en forma de radiación electromagnética de diferente longitud de onda a causa de los cambios en los estados de vibración, rotación y electrónica de átomos y moléculas (19).

j. Colectores de radiación solar

1. Generalidades

El objeto expuesto a la radiación solar eleva su temperatura hasta que las pérdidas de calor igualan a las ganancias; las pérdidas dependen de la emisión de radiación del material caliente, del movimiento del aire frío que lo rodea y de la conductividad térmica de los objetos en contacto con él. Las ganancias dependen de la intensidad de la radiación y del poder absorbente de su superficie (16). La radiación solar se puede recoger de dos maneras fundamentales para producir incrementos en temperatura: cubriendo una superficie receptora con una lámina de vidrio o plástico transparente a la luz del sol, y enfocando la radiación solar recibida en una gran superficie a un receptor de superficie pequeña.

2. Concepto

Una lámina metálica (u otro absorbente) ennegrecida es colocada al sol así que mucha de la radiación solar que alcanza la superficie es absorbida e inmediatamente convertida en calor. El calor es transferido a un flujo el cual está pasando a lo largo de la superficie absorbente, y el fluido calentado es tomado para destinarlo a un proceso, como puede ser para el secado de alimentos. Generalmente se colocan una o más cubiertas transparentes sobre la lámina absorbente para evitar las pérdidas de calor hacia la atmósfera. Lo expuesto se rige por la ecuación:

$$\text{Energía absorbida} = \text{Energía ganada} - \text{Energía perdida (45)}.$$

3. Clasificación de los colectores

Los colectores solares se clasifican usualmente en colectores planos que no enfocan y en colectores focales. Los colectores planos

suelen ser estáticos, aunque pueden ser movidos cada cierto tiempo del año; los colectores focales, a diferencia de los anteriores, siempre son movidos a lo largo del día para seguir al sol.

3.1 Ventajas y desventajas de los colectores

Generalmente los colectores planos son más baratos, aprovechan tanto el calor de la radiación directa como el de la difusa, pueden funcionar tanto en días nublados como claros. Los colectores focales, por otra parte utilizan únicamente la radiación directa y pueden producir temperaturas mucho más altas.

4. Colectores solares de placa plana

4.1 Generalidades de las aplicaciones de la energía solar

De las aplicaciones de la energía solar, la más práctica entraña la utilización de colectores de placa plana para sistemas de calefacción. El calentador solar a base de un líquido fue invención de N. B. Saussure durante la segunda mitad del siglo XVII; Herschel (1937) y Tellier (1985) también ensayaron calentadores solares a base de agua. Aún en épocas anteriores las poblaciones indígenas de Africa, de los países árabes, de Australia, China, India y Pakistán mostraron su ingenio calentando el agua contenida en vasijas de cobre de forma especial colocadas al sol durante los meses de invierno. Por otra parte, los calentadores de aire, son una invención reciente; K. W. Miller introdujo el

calentador de aire de placa de vidrio superpuestas en 1943 (60).

5. Clasificación de los colectores planos solares por su incremento de temperatura en el calentamiento de aire

Estos pueden clasificarse en colectores planos de temperatura baja, media y alta.

5.1 Colectores solares planos de temperatura baja

Se denominan así a los colectores solares planos que aumentan la temperatura del aire ambiente en valores menores de 40°C. Cuanto menor es el incremento de temperatura requerido, tanto más simple y eficiente es el colector solar (66).

5.2 Colectores solares planos de temperatura media

Son colectores que logran incrementos de temperatura entre 50 y 150°C.

5.3 Colectores solares planos de temperatura alta

Son colectores que logran temperaturas sobre los 150°C. Estos, como los anteriores, usan más de una lámina transparente y además usan concentradores con seguimiento automático del sol, para que los rayos solares reflejados coincidan con la superficie colectora de radiación (66).

5.3.1 Tipos de colectores solares planos de temperatura baja

Según (66), existen cuatro tipos de colectores solares planos de temperatura baja para el secado de granos:

colectores solares planos de superficie absorbente cubierta por una lámina transparente, colectores solares de plano suspensos y colector almacenador de energía de superficie absorbente cubierta por una lámina transparente.

6. Orientación y ángulos de inclinación de los colectores

Según lo planteado en (16), para aprovechar la radiación solar al máximo, sabiendo que la intensidad de la radiación solar es mayor cuando la superficie receptora se aproxima a la posición normal del sol, el colector se coloca usualmente inclinado en la dirección norte-sur y mirando al ecuador. Ajustar el ángulo del colector a los cambios diarios y estacionales del sol es difícil y costoso.

Numerosas investigaciones (5, 44, 56, 62, 66) revelan varios criterios sobre el ángulo de inclinación de un colector solar, así, cuando un colector solar va a ser utilizado durante el año, el ángulo debe ser igual a la latitud geográfica, a la latitud más 10° en invierno y menos 15° en verano, igual a $\pi/2 - B$ máximo. Sin embargo, muchos autores coinciden en recomendar para procesos de calentamiento un ángulo óptimo de inclinación del colector igual a la latitud más 10° o más 15° .

7. Materiales de construcción de los colectores solares planos

Las superficies de los colectores planos se suelen hacer de chapa metálica, fundamentalmente hierro, cobre o aluminio, para obtener una buena conductividad. Se ennegrecen con pintura mate que a menudo contiene negro de humo, o se cubren con un revestimiento negro producido químicamente.

En general, el armazón de un colector puede ser construido de madera, metal, plywood, tabla dura, mimbre o bambú (53).

El aislante puede ser de materiales localmente disponibles tales como aserrín, bagazo, fibra de coco, rechazos de lana (53). Según (60) las capas aislantes que revisten la base y lados del colector deben tener un espesor mínimo de 5 cm. Actualmente se acostumbra utilizar espuma de poliuretano rígida, material aislante que posee una muy baja conductividad térmica, reduciéndose así las pérdidas por conducción.

Entre los materiales transparentes utilizados en los colectores solares de placa plana podemos mencionar el vidrio y el plástico. El vidrio es transparente a la luz solar excepto a la ultravioleta, mas es opaco a la infrarroja, actuando de esta manera como una trampa de calor eficaz cuando se emplea como tapa o cubierta. El plástico, la posibilidad de conseguir láminas delgadas y fuertes de plástico con propiedades especiales es importante para el uso en colectores solares. La absorción dentro de la película de plástico es menor que en el vidrio porque las películas son mucho más delgadas que las láminas de vidrio. Algunos de los plásticos más corrientes como el polietileno, los celulósicos, los acetatos, el cloruro de polivinilo y el poliestireno, tienen una vida muy corta a la intemperie. Hay muchos factores que influyen en ellos incluyendo la acción fotoquímica de la luz ultravioleta, humedad, temperatura, sacudidas y vibraciones continuas. y tensiones debidas a vientos fuertes (16).

7.1 Características de las películas plásticas usadas en los colectores solares

En años recientes se han realizado investigaciones sobre la duración de materiales plásticos expuestos a la radiación ultravioleta. Muchos tipos de plásticos están disponibles para uso como cubiertas y absorbentes en colectores solares. Las características físicas de las películas plásticas las cuales tienen su mayor aplicación son (44):

- Peso ligero, su gravedad específica es baja alrededor de 0.91 comparado con 2.72 para el vidrio.
- Por su flexibilidad, elasticidad y resistencia, permite la fácil fabricación de colectores en varios diseños.
- Alta transmisión de la radiación, las películas plásticas claras, tales como las de polietileno, tienen una transmitancia solar tan alta como 0.93 comparada con 0.90 para el vidrio.

Algunas desventajas del uso de las películas plásticas en colectores solares son:

- Transmisión de radiaciones de longitud de onda larga
- Efectos asociados con radiaciones ultravioleta, y
- Fragilidad (se halla sujeto a cortes o desgarraduras).

Cuando ciertos plásticos son usados para cubrir colectores solares, las pérdidas de calor hacia arriba son mayores que

con el vidrio, a causa de la transmisión que posee el plástico de la mayoría de las radiaciones de longitud de onda larga, mientras que el vidrio es casi opaco a estas radiaciones; el polietileno comercial claro tiene una transmisibilidad térmica alrededor de 0.71 comparado a 0.12 para el polietileno claro y 0.044 para el vidrio. De las películas de plástico propuestas, el polietileno es el de mayor uso por su bajo costo, sin embargo, tiene una vida corta menor de 2 años bajo continuo uso y, probablemente, más de 4 años bajo uso intermitente (44).

8. Tiempo de funcionamiento de los colectores solares de placa plana

La radiación solar es mucho menor por la mañana temprano y al final de la tarde que al mediodía, y la radiación al norte y al sur del ecuador es menor que en el ecuador; para objetos de secado se debe utilizar el tiempo comprendido entre las 8 h y las 17 h, intervalo durante el cual los colectores solares pueden captar energía (33, 40, 57).

9. Eficiencia de un colector solar

Algunos centros de investigación de los E.E.U.U. se han concentrado en determinar la medida de eficiencias instantáneas; otros se han concentrado en eficiencias diarias, o en términos de promedio de eficiencia de largos tiempos (70). Según (8), la eficiencia de un colector es una medida de la cantidad de energía solar que incide sobre un colector solar comparada con la cantidad de energía útil (Q) que provee el colector, o es una medida de cuan bien los colectores capturan y convierten la radiación

solar, para usarla como energía calórica. Se recomienda como método para determinar la eficiencia del colector dividir la energía útil del colector entre la cantidad de energía incidente que es perpendicular al colector.

$$\begin{aligned}\text{Fórmula de cálculo: } E &= Q/I_G \cdot A \\ Q &= I_G \times E \times A \\ t &= I_G \times E \times A \times f \times F\end{aligned}$$

donde: E = eficiencia, Q = energía colectada, t = incremento de temperatura (temperatura de salida menos temperatura de entrada), I = radiación solar global, A = área del colector, F = flujo de aire volumétrico y f = factor que incluye densidad y calor específico del aire.

K. Secado solar indirecto de granos básicos mediante el uso de colectores de placa plana

1. Introducción

El secado solar se puede producir directamente exponiendo el material sólido a la radiación solar, con o sin cubierta transparente. También se puede realizar indirectamente por calentamiento a través de una corriente de aire de baja humedad relativa. Puesto que el aire tiene una baja capacidad calórica, es necesario utilizar grandes volúmenes de aire y hacerlo pasar a través de impulsores eléctricos.

Productos básicos de la alimentación de América Central y del Sur como maíz, frijol y arroz al alcanzar su estado de madurez contienen un alto porcentaje de agua (20%) en su interior. Esta humedad es difícil

de ver, mas puede sentirse al morder el grano con los dientes o apretando con los dedos. Estos granos básicos no se pueden almacenar sin que sufran un fuerte deterioro o pérdida de su calidad. Para producir un buen grano es necesario un secado durante el almacenamiento, bajando su humedad hasta 12 o 13% (40).

En algunas regiones se acostumbra secar los granos básicos en el campo; el maíz, por ejemplo, se deja secar quebrando la caña y doblando la planta hacia abajo. Los granos se terminan de secar después de cosecharlos exponiéndoles al sol. Esta manera de secar granos tiene el inconveniente de que al producto puede caerle la lluvia y también pueden comérselo los pájaros, ratas, insectos y otros animales mientras se estén secando (40). A causa de la importancia de su sabor, los frutos y vegetales son especialmente sensibles a las condiciones de secado, tales como sobrecalentamiento, lluvias, polvo, tiempo de secado largo y crecimiento de hongos o bacterias (16).

Según (6, 18) los colectores solares de temperatura baja son ampliamente usados para el secado de granos. Este secado normalmente requiere mucha energía; sin embargo, el uso de colectores solares proporciona buenas economías.

La mayor aplicación de la energía solar para el secado de granos ha sido mediante sistemas de baja temperatura; el flujo de aire incrementa pocos grados de temperatura al pasar por un simple colector solar (4). A causa de tener poco incremento de temperatura el aire en los colectores solares planos, se usan grandes flujos de aire con lo cual se alcanzan altas eficiencias (18).

Según trabajos del ICAITI, la velocidad de remoción del agua depende de tantas variables no controlables que no puede hacerse una comparación exacta entre los experimentos, no obstante, el secado solar indirecto con aire forzado es el más rápido para secar granos. Un secador solar directo alcanza temperaturas altas en el interior del secador (60°C); se utiliza para secar maíz y frutas, pero no es recomendable para frijol ni arroz; pues las temperaturas altas causan agrietamiento y decoloración de los granos (Lindbland y Druben, 1976).

3. Clasificación de los secadores solares

Los secadores solares se clasifican según el modo de calentarse o la manera como se utiliza el calor derivado de la radiación solar (40, 60). A este respecto, se han establecido varias categorías generales que se definen a continuación. En general, los secadores se han clasificado según su principal modo de funcionamiento. Algunos de los secadores directos y mixtos emplean también ventiladores de circulación y no son, en términos estrictos, sistemas totalmente pasivos. Los secadores que para su funcionamiento utilizan únicamente energía solar se clasifican como sistemas pasivos.

3.1 Secado al sol o natural

Estos secadores hacen uso de la acción natural de la radiación solar y de la temperatura, humedad y movimiento del aire ambiente para lograr el secado.

3.2 Secadores solares directos

En estas unidades el material que se ha de secar se coloca en un receptáculo con cubierta o paneles laterales transparentes. El calor es generado por la absorción de radiación solar sobre el producto mismo, así como sobre las superficies internas de la cámara secadora. Este calor evapora la humedad del producto que se ha de secar. Además, sirve para expandir el aire en el recinto, provocando así la eliminación de la humedad por la circulación del aire.

3.3 Secadores solares indirectos

En estos secadores la radiación solar no cae directamente sobre el material que se ha de secar. El aire se calienta en un colector solar y se conduce luego a la cámara secadora para deshidratar el producto.

3.4 Secadores solares mixtos

En estos secadores la radiación solar cae directamente sobre el material que se ha de secar; además, el aire es precalentado mediante un colector solar previo al secado del producto.

3.5 Secadores híbridos

Estos secadores utilizan otra fuente de energía, por ejemplo, un combustible o la electricidad, para suministrar calor o ventilación suplementarios.

3.6 Secado de granos

Prácticamente el secado de todos los productos agrícolas especialmente granos se realiza en el período decayente. Los granos de cereales no presentan durante el secado velocidad constante, a menos que se cosechen muy inmaduros o que tengan agua condensada en su superficie, pero este período constante es mínimo comparado con todo el proceso de secado y, por ende, se elimina del cálculo (17, 37).

El período de secado a velocidad decreciente está controlado principalmente por el producto e involucra: un movimiento de humedad dentro del material hacia la superficie por difusión y remoción de humedad de la superficie (17, 37).

La masa se transfiere como líquido y/o vapor dentro del sólido y como vapor desde las superficies húmedas. Tanto los mecanismos internos como externos influyen en el secado, sin embargo, es más importante el mecanismo interno. Se sabe muy poco sobre estos mecanismos (17).

En granos, el contenido de humedad inicial es usualmente menor que el contenido de humedad crítico, de tal manera que todo el secamiento ocurre en el período de velocidad decreciente (30).

El factor más importante para determinar si un grano ganará o perderá humedad bajo las condiciones de humedad relativa

y temperatura del aire de secamiento es la humedad en el equilibrio (M_e), que indica aquella humedad del grano en que la razón de pérdida de humedad al ambiente que lo rodea es equivalente a la razón de ganancia de humedad del grano del ambiente a su alrededor (12, 30, 35, 37).

La predicción de la velocidad de secado de un grano es más complicada durante el período de velocidad decreciente. Aunque se han propuesto muchas teorías para predecir el secado de granos en el período decreciente, sólo las relaciones semiteóricas y empíricas han demostrado ser útiles para el diseño de secadores (12, 17).

Roa y Macedo (65), presentan una nueva ecuación para determinar el tiempo de secado de granos como frijol, maíz, café, en camadas delgadas.

$$\frac{M - M_e}{M_o - M_e} = e^{-m(P_{vs} - P_v)^n} \cdot t^q$$

III. OBJETIVOS

A. Generales

El presente trabajo pretende determinar si el secado solar natural del grano de frijol acelera el desarrollo de su endurecimiento y brindar las bases para el establecimiento de secadores solares de tipo indirecto.

B. Específicos

- Determinar los tiempos y velocidades de secado del frijol en grano recién cosechado, por secado solar natural e indirecto.
- Evaluar la acción del secado solar natural e indirecto sobre el endurecimiento del frijol.
- Determinar el efecto que el secado solar natural e indirecto tiene sobre el color del grano (crudo y cocido) y caldo de cocción, así como sobre la calidad microbiológica del producto seco.
- Determinar los parámetros fundamentales de un colector solar de placa plana a usarse en secadores solares indirectos, en base a su eficiencia.

IV. TRASCENDENCIA DEL ESTUDIO

Si la preocupación de los países del tercer mundo, organismos y centros de investigación a nivel mundial, es la de buscar nuevas fuentes alimenticias y/o mejorar la calidad de las ya existentes, es evidente la necesidad de investigar por qué el frijol no es bien utilizado por nuestro organismo, ya sea por su grado de dureza o por su bajo valor nutricional.

El problema del endurecimiento del frijol, es un problema en la América Latina. Según (1), se ha calculado sólo en Centro América en 1977 se produjo una pérdida de alrededor de 12 millones de dólares debida a este fenómeno. El efecto del secado al sol es una posible causa de este endurecimiento, hipótesis a ser demostrada.

El endurecimiento del frijol debido a un mal uso de la energía solar, se manifestará directamente en un aumento del tiempo de cocción de la semilla y, por ende, un decremento en su sabor, color y valor nutricional y un aumento del consumo de energía no renovable lo que conduce a ser descartado por el consumidor y por el industrial. Lo anterior conlleva a la falta de incentivo para una mejor producción por parte del mediano y grande agricultor, demostrándose que en los últimos años la disponibilidad de frijol ha disminuido (64), han subido los precios y esta leguminosa es menos accesible a los bajos estratos sociales.

El uso de la energía solar en el secado de alimentos es particularmente atractivo, a causa de que muchos alimentos requieren bajas temperaturas para su secado (alrededor de 80°), rango de temperatura al cual la

energía solar es mejor colectada y a bajo costo (7). Elimina en parte el problema de la contaminación ambiental.

Con la presente investigación se contribuirá con la tecnología simple de secado indirecto al sol para evitar el endurecimiento del frijol y una tecnología apropiada que permita en un futuro construir colectores solares con la mano de obra artesanal y los materiales existentes en las áreas agrícolas latinoamericanas.

Se dejarán sentadas las bases para futuras investigaciones en el vasto campo de los alimentos y la energía solar y se eliminará en parte el problema de la contaminación ambiental.

En su aspecto académico, proporcionar los conocimientos fundamentales que relacionan la energía solar directa e indirecta y la acción de los fenómenos en el frijol.

Económicamente, se producirá un ahorro de energía al utilizar un frijol menos duro, cuando se use el secado por medio de una energía gratuita e inagotable. Industrialmente sabemos que calentar aire por los medios tradicionales y artificiales con fines de secado, es oneroso económicamente en virtud de la baja conductividad térmica del mismo ($k = 0.014$) (37).

V. MATERIALES Y METODOS

A. Materiales

1. Colector solar de placa plana con cubierta de polivinilo transparente y flexible, acoplado a un secadero solar indirecto

En esta investigación se utilizó este tipo de colector solar que fue construido en el INCAP.

1.1 Especificaciones

Este colector está construido por una placa absorbente de energía solar de lámina de hierro galvanizado lisa, pintada de negro mate con una cubierta de polivinilo transparente flexible paralela a la placa absorbente a 11.5 cm de separación con paredes laterales también de hierro galvanizado adosado a madera de capas (plywood) de 2.5 cm de espesor.

La longitud del colector en su parte plana es de 360 cm x 61 cm de luz. Tanto la parte lateral como inferior están recubiertas de material aislante poliuretano rígido de 3 cm de espesor.

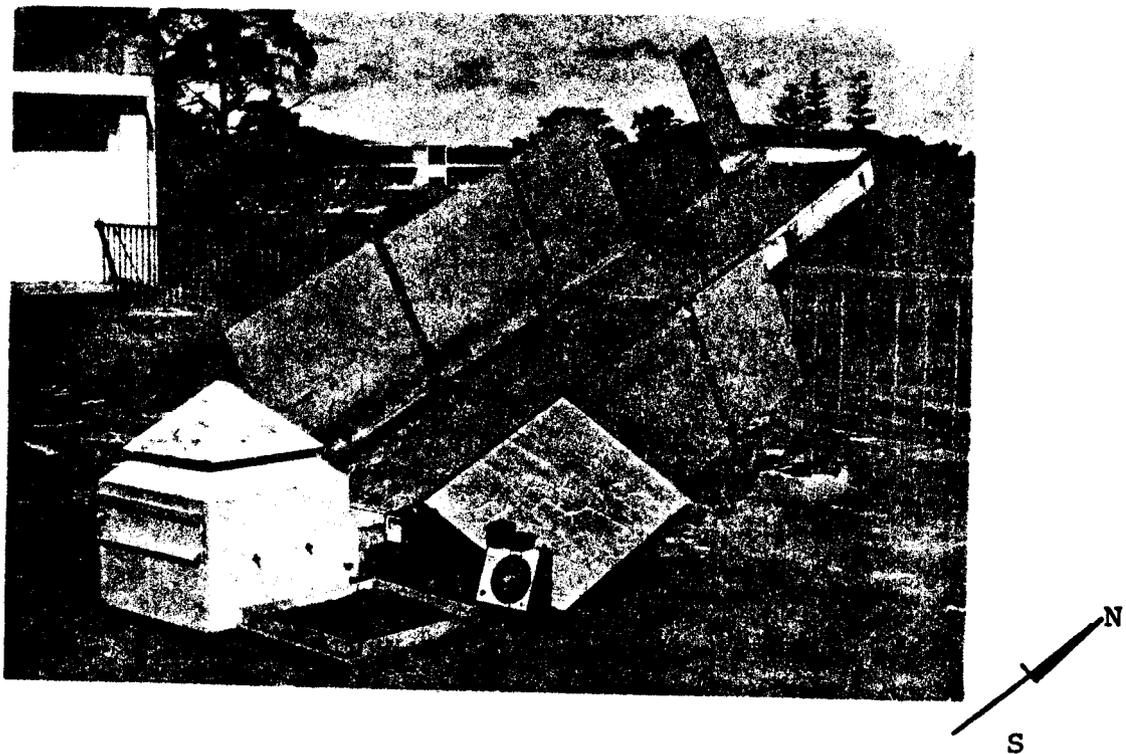
Posee un ventilador centrífugo eléctrico de 1/20 HP, colocado en forma perpendicular y lateral a la parte longitudinal del colector.

Para la regulación del flujo de aire se incorporó un reóstato. En la parte lateral y longitudinal del colector solar

se colocaron reflectores de madera plywood recubiertas con papel de aluminio.

El gabinete de secado tiene la capacidad para dos bandejas, cada una de las cuales tiene un área de 0.37 m^2 y una capacidad de 3.2 Kg de frijol. Está construido de madera plywood de 2.5 cm de espesor, cuyas dimensiones internas son: 61 x 61 x 45 cm.

A la entrada del aire y con el fin de unificar la distribución del mismo en el interior del secadero posee dos paletas de 4 y 8 cm respectivamente, colocadas en ángulo de 45° .



Gráfica 1. Colector solar de placa plana y gabinete de secado

2. Frijol

Se trabajó con dos variedades de frijol común Jutiapán y Carjlic de las cosechas de abril y agosto respectivamente y que no recibieron radiación solar antes de las pruebas de secado.

La muestra de frijol Jutiapan, se obtuvo secada indirectamente en el campo de cultivo. En vista de no disponerse para la época de inicio de las pruebas solares de frijol recién cosechado, se procedió a hidratar el citado frijol con una relación agua frijol 3:1, por un tiempo de 40 min a temperatura ambiente. Las muestras luego de su selección y limpieza por aire, se almacenaron a 4°C previo a su análisis y secado. El frijol se colocó dentro de fundas de polietileno selladas, para evitar pérdidas de humedad.

B. Métodos

1. Eficiencia del colector solar

Para la evaluación de eficiencia se aplicó la fórmula expuesta en trabajos de Diffie y Hellicson (19, 39):

$$E = \frac{m \cdot C_p \cdot \Delta t \cdot 100}{I_G \cdot A}$$

donde: E = Porcentaje de eficiencia del colector

m = Masa de aire que entró al colector

C_p = Calor específico del aire determinado a la presión de Guatemala (640 mm de Hg).

I_G = Intensidad solar global o total

A = Area del colector solar

Δ_t = Temperatura del aire a una longitud determinada del colector menos temperatura del aire de entrada al mismo.

1.1 Eficiencia del secador

La eficiencia del secador (colector solar + gabinete de secado), se calculó con la ecuación (40):

$$\% Es = \frac{L \cdot M}{E \cdot I_G \cdot A \cdot H} \cdot 100$$

donde: % Es = Porcentaje de eficiencia del secador

E = Porcentaje de eficiencia promedio del colector solar

I_G = Intensidad solar total

L = Calor latente de vaporización del agua en el grano

M = Masa de agua removida

A = Area del gabinete de secado

H = Horas-sol transcurridas durante el secado

Las temperaturas para la evaluación del colector solar, se registraron a diferentes longitudes del colector, como se puede ver en la Gráfica 1, mediante el uso de termopares, las cuales fueron protegidas de la radiación solar.

Para la evaluación se ensayaron variables como ángulos de inclinación del colector respecto a la horizontal 0.00° , 14.61° , 24.61° y 29.61° ; flujo de aire 0.40, 2.03 y 2.22

m³/min; presencia o ausencia de estropajo metálico tanto pintado de negro mate como sin pintar.

1.2 Orientación y ubicación

El colector solar se orientó de sur a norte, mirando hacia el sur y colocado en la terraza del edificio.

Las medidas de temperatura y radiación solar tendientes a la evaluación, se realizaron de 9:30 a 13:00 horas en días en su mayoría despejados, esto en virtud de no contar con un registrador de radiación directa y difusa.

Para las mediciones de radiación solar se usaron las gráficas de radiación global proporcionadas por el actinógrafo Fuess 58C del Instituto de Sismología Vulcanología Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH), para las evaluaciones a 0° de inclinación del colector y, para los demás ángulos se aplicó la fórmula para horas de cielo despejado propuesta por Duffie (13).

$$R = R_b = \frac{\cos(L-T) \cdot \cos D \cdot \cos H + \sin(L-T) \sin D}{\cos L \cdot \cos D \cdot \cos H + \sin L \cdot \sin D}$$

donde: $R = R_b = I_G$ = Radiación o intensidad solar global
para día despejado

L = Angulo de latitud

T = Angulo de inclinación del colector

D = Angulo de declinación del sol

H = Angulo horario del sol

1.3 Tiempo de secado

A pesar de existir buenos fundamentos teóricos sobre las diferentes ecuaciones para la predicción del secado de granos, ellas no han podido ser aplicadas ampliamente porque: los productos agrícolas no presentan formas regulares, los coeficientes de difusión son expresiones complejas y no muy bien determinadas, la integración y resolución de ecuaciones originan tiempos prolongados y el uso de computador.

Brooker y col. 1974, reporta ecuaciones simples de secado para camadas delgadas de granos, las cuales han sido derivadas empíricamente.

Roa y Macedo (65), presentan una nueva ecuación de secado para granos (frijol, café, maíz, etc.) con una camada delgada, obteniendo muy buenos resultados, los cuales se ajustan a la realidad.

Para estimar el tiempo de secado se utilizó la fórmula citada por los autores Roa y Macedo (65):

$$\frac{M - M_e}{M_o - M_e} = e^{-m(P_{vs} - P_v)^n \cdot t^q}$$

donde: M = Humedad promedio del grano al final del secado

M_o = Humedad inicial del grano, decimal base seca

M_e = Humedad en el equilibrio, decimal base seca

P_v = Presión de vapor del agua en el aire de secado, Kg/m^2

P_{vs} = Presión de saturación de vapor de agua en el aire de secado, Kg/m^2

t = Tiempo de secado en horas

m = Parámetro de ecuaciones de secado de camada delgada

n = Parámetro de ecuaciones de secado de camada

q = Parámetro de ecuaciones de secado de camada delgada

1.3.1 Contenido de humedad de equilibrio (Me)

Se calculó mediante la ecuación siguiente (30):

$$Me = 0.01 \left\{ \left[\frac{-\ln(1-HR)}{0.000035953(T + 193.091)} \right]^{0.5669} \right\}$$

donde: T es la temperatura del aire en equilibrio, en $^{\circ}\text{C}(T_e)$

T_e = (temperatura de salida del colector + temperatura de salida del secador)/2

HR = Humedad relativa del aire en equilibrio (HRe), base decimal

HRe = Es el promedio de la HR del aire saliendo del colector y la HR del aire saliendo del gabinete de secado.

1.4 Porcentaje de eficiencia de secado

Se calculó con la siguiente ecuación (40):

$$\% \text{ de eficiencia de secado indirecto} = \frac{L \cdot M \cdot 100}{I_G \cdot A \cdot H}$$

donde: L = Calor latente de vaporización del agua en el grano, Btu/lb

M = Libras de agua removidas

I_G = Intensidad solar promedio, cal/min . cm²

H = Horas-sol transcurridas durante el experimento

A = Area del colector solar, 3.25 m²

El calor o energía latente de vaporización del agua en el grano depende del contenido de humedad del mismo y de la temperatura. Su cálculo se hizo utilizando gráficas y fórmulas citadas por Brooker y col., 1974 (12).

2. Análisis físicos

2.1 Tiempo de cocción

Se evaluó utilizando el método descrito en Nutritional Standards and Methods of Evaluation for Food Legume Breeders (42).

2.2 Dureza del grano

La dureza del grano de frijol en sus diferentes formas de secado, se determinó usando 12 granos con un tiempo de cocción de 20 minutos. Para esta prueba se empleó el texturómetro INSTRON Modelo 1132 serie 27 (1974), provisto de una

broca de penetración de 2 mm de diámetro. Los resultados se expresan como Kg de fuerza/mm².

2.3 Coeficiente de hidratación

Para su cuantificación, se siguió el método citado en Nutritional Standards and Methods of Evaluation for Food Legume Breeders (42).

2.4 Absorción de agua

Su determinación se hizo siguiendo lo descrito en el método de Linares y Bosque (49), pesando 10 g de frijol.

2.5 Porcentaje de cáscara dura

Se efectuó conforme a lo manifestado por el método de Antunes y col. (2).

2.6 Color del grano

Su determinación se hizo visualmente por parte de ingenieros del ICTA, en vista de no disponer de aparatos propios para este análisis.

2.7 Color de cotiledón y caldo de cocción

Estos análisis fueron medidos en el Tintómetro Lovibond, de acuerdo a lo descrito por Molina y col. (58). Para el color del cotiledón se hizo la cocción del grano por 20 min. y se peló cuidando de no ensuciar el cotiledón, luego se secó a 60° en estufa, se molió y se vio el color. En el caso del caldo de cocción, de cada tiempo de cocción se

tomó 1 ml y se llevó a 10 ml con H₂O destilada y se analizó el color.

3. Análisis químicos

3.1 El análisis de humedad y proteína se hizo mediante las técnicas de AOAC (3), en las pruebas de secado la humedad del grano, se determinó utilizando el Medidor Portátil de Humedad marca Dole, específico para granos.

3.2 Polifenoles totales y condensados

Se determinaron según los métodos de Price (63) y Hagerman (32) respectivamente.

3.3 Actividad de polifenoloxidasas

La actividad de esta enzima (PFO) fue medida basándose en el método descrito por Flurkey y Jen (26).

3.4 Índice de solubilidad de nitrógeno

Para este análisis de solubilidad de nitrógeno del frijol seco en agua, se procedió de acuerdo a lo descrito en el método de la A.O.C.S. (4).

4. Análisis microbiológicos

4.1 Se tomaron 10 granos de cada una de las muestras de frijol investigadas y se hizo un recuento total de microorganismos; también se cuantificó hongos y levaduras utilizando cajas de Petri conteniendo medios Agar Nutritivo y Sabourand, de acuerdo al método de Clyde y Kauffmann (13).

5. Análisis biológicos

5.1 Para la preparación de las dietas a base de frijol con sus diferentes tratamientos de secado, se procedió a la cocción del frijol dando un tiempo igual al necesario para obtener el 50% de granos rotos (cálculo mediante ecuación de regresión lineal). Para la preparación de las dietas se eliminó el agua de cocción del frijol, se ajustaron a un nivel de proteína del 10%, además se prepararon dietas estándar a base de caseína con 0.3% de metionina, y libre de nitrógeno (DLN). Se determinó con las ratas en experimentación NPR (73), trabajando con 128 ratas raza Wistar de 22 días de edad, empleando 8 ratas (4 machos y 4 hembras) por grupo experimental por un tiempo de 14 días.

6. Almacenamiento

6.1 Las muestras de frijol Jutiapan secado en el campo de cultivo, rehidratado, secado al natural, secado indirectamente y secado en horno fueron almacenadas en fundas de tela por tres meses a una temperatura de 30°C y una humedad relativa de 60%.

7. Análisis estadístico

7.1 Se hizo análisis de regresión lineal, regresión lineal ponderada de la transformación logística, análisis de ANOVA, prueba de homogeneidad de varianzas mediante prueba de Box, prueba de significación de Tukey (29, 71).

VI. RESULTADOS

Se presentan a continuación los resultados en cada fase experimental.

A. Fase 1

Pruebas de secado solar

En el Cuadro 1 se exponen los diferentes parámetros controlados durante el secado de frijol Jutiapan al natural (al sol) y el secado indirecto llevado a cabo en el gabinete de secado unido al colector solar de placa plana. Los dos tipos de secado iniciaron y terminaron a una misma hora. Se ve que para bajar la humedad del frijol rehidratado de 19.36% a 11.24% y 12.50% en el secado natural e indirecto respectivamente, se necesitaron alrededor de 6 horas 38 min, en días por lo general despejados. Mediante el secado al sol directamente vemos que, el frijol por recibir una mayor temperatura sobre su superficie (alrededor de 36.6°C), éste logra una menor humedad con un mismo tiempo de secado, lo cual es de esperarse.

En los Cuadros 2, 4 y 5 se exponen los parámetros controlados en el secado de frijol Carjlic recién cosechado con una humedad promedio de 18.74% y 17.28%, se logró llevar a humedades alrededor de 11.10% y 11.21%, para el frijol secado al natural e indirecto respectivamente, en tiempos de secado que fluctuaron entre 9h 22min y 17h10min, dependiendo el mayor o menor tiempo de las condiciones atmosféricas reinantes en los días de secado.

Según los cuadros anteriores citados podemos ver que no existe una diferencia marcada en el porcentaje de humedad final del frijol secado al natural e indirectamente al tener un mismo tiempo de secado.

Al graficar el valor decimal de pérdida de humedad en base seca del grano en función del tiempo de secado los puntos presentan en todos los casos una regresión lineal con un $r(P < 0.01)$ altamente significativo, Figuras(1, 2, 4, 5, 6 y 7).

Para el fin de esta investigación, se llevó a manera de control un secado de las dos variedades de frijol en horno con convección forzada de aire y a una temperatura de secado alrededor de 40°C; los datos experimentales se exponen en los Cuadros 1 y 3. En promedio se llevó de un contenido de humedad inicial de frijol de 18.89% a 10.66% de humedad final en un tiempo de 12 horas 27 minutos.

Tiempo de secado teórico

Para todas las pruebas de secado, se calculó su respectivo tiempo de secado en el período decaente, mediante la fórmula exponencial planteada anteriormente. En el Cuadro 8 no se observa una diferencia sustancial entre los tiempos de secado al natural, indirecto y en horno. Los tiempos son mayores en comparación a los estimados experimentalmente bajo las condiciones de humedades inicial, final y de equilibrio del frijol.

Cálculo de la eficiencia promedio del colector solar

En el Cuadro 7 se revela la eficiencia del colector solar en función sólo de su incremento de temperatura e intensidad solar recibida. Su valor promedio 8.95% es inferior a los valores observados en la literatura (39, 40, 45).

Cálculo de la eficiencia del secado solar

En el Cuadro 9 se exponen los valores de la eficiencia de un secado solar, estos valores concuerdan con lo reportado en (40). Es de notar que la eficiencia del secado llevado a cabo en el mes de mayo, con días en su mayoría despejados es alta y disminuye completamente tendiendo a cero en días en su mayoría nublados, lo cual es lógico.

Cálculo de la eficiencia del colector solar de placa plana

Para este cálculo se tomaron en cuenta algunas variables recomendadas en la literatura como ángulos de inclinación del colector, flujos de aire y el uso o no de estropajo pintado y no pintado de negro. Las decisiones se tomaron en base a su análisis estadístico. Sus valores se presentan en los Cuadros 20, 21 y 22.

1. Análisis estadístico para la evaluación del colector

Se realiza una evaluación del colector solar de placa plana en base al cálculo de su eficiencia (EF), calculada a diferentes longitudes del mismo ($L = 36, 126, 216$ y 306 cm). La eficiencia es dependiente de variables como flujo de aire que en este caso se representa por las marcas del reóstato 40, 80 y 120; ángulos de inclinación del colector solar respecto al plano horizontal $0.00, 14.61, 24.61, 29.61^\circ$; presencia de estropajo metálico pintado de negro mate, no pintado y, la ausencia del mismo en el colector solar.

Es necesario conocer con criterios estadísticos las variables más adecuadas que presenten un mejor efecto de eficiencia y/o una menor variabilidad con el fin de descartar parcialmente aquellas que presenten problemas de esta naturaleza.

Análisis

a. Análisis de correlación entre las eficiencias de las diferentes longitudes arriba mencionadas del colector solar EF1, EF2, EF3 y EF4; independientemente del efecto de las variables mencionadas, esto conduce a medir la naturaleza de la asociación entre las eficiencias. Los resultados indican una asociación positiva significativa en todos los casos.

b. Análisis de regresión

La EF1 presenta valores bajos de coeficientes de determinación r^2 (alrededor de 45%) con respecto a las EF2, EF3 y EF4. Este comportamiento se explicaría en virtud de que el diseño del colector en este tramo difiere del resto del mismo y, por ende, de las otras eficiencias longitudinales. En esta sección el aire entra al colector lateralmente y en forma normal a la longitud del mismo, el aire se calienta por debajo de la plancha metálica expuesta externamente a la energía solar, luego el aire gira 90° y se dirige a lo largo del colector de placa plana.

En cambio por un lado, la EF2 con relación a EF3 y EF 4 y por otro, la EF3 con EF4 presentan valores altos de r^2 (95%). Si consideramos que r^2 es una medida que explica la variabilidad asociada entre las eficiencias, todas las eficiencias excepto la primera, presentan o miden el mismo fenómeno. A partir de EF2 a EF4 se mantiene una tendencia lineal, lo cual se comprueba al observar los valores de incrementos de temperatura experimentales.

c. Análisis preliminar de la variabilidad de EF1, EF2, EF3, EF4

Se aplica un análisis preliminar con todas las variables experimentadas y para cada una de las eficiencias longitudinales. Se presentan los valores tabulados de eficiencias promedio, desviación estándar y coeficiente de variación en el Cuadro 20.

El Cuadro 20 considera la variabilidad de estropajo. En general, el uso de estropajo metálico pintado de negro mate presenta una variabilidad mayor en contraste con el uso de estropajo metálico sin pintar y cuando no se usa estropajo.

En consecuencia se recomienda, basado en estos resultados, no considerar el uso de estropajo pintado.

En los casos con y sin estropajo, se puede decir que hay una tendencia a disminuir la variabilidad a lo largo del colector, es decir, los valores en EF3 y EF4 \angle EF1 y EF2.

El efecto negativo del estropajo metálico pintado según este estudio, se puede atribuir al hecho de que los cuerpos negros se calientan y se enfrían rápido. Al no estar pintado de negro el estropajo, éste tendrá una tendencia a disminuir su velocidad de calentamiento y enfriamiento, dando lugar a menores variaciones.

En cuanto a la variabilidad del ángulo, todos los ángulos considerados presentan una variabilidad aceptable en las mediciones.

En relación con variabilidad del flujo (m^3 /min) podemos expresar que en términos de consistencia o de menor variabilidad, el flujo de 2.22 es mejor que los flujos de 2.03 y 0.40. Tomando en cuenta los valores de eficiencia podemos ver que, flujos de 2.03 y 2.22 representan los valores mayores en comparación al flujo de 0.40.

También del análisis se revela que los flujos de 2.03 y 2.22 no difieren significativamente, lo cual puede dar lugar a usar un flujo de 2.03 con una economía en el consumo de energía.

Como conclusión general se puede decir que este estudio no permite tomar decisiones o criterios discriminativos de selección u optimización de variables en virtud de la naturaleza misma del experimento en sí, en el cual, según la literatura la eficiencia está sujeta a otras variables como condiciones climatéricas que escapan a nuestro control y tomando también en cuenta que la evaluación estuvo sujeta a corrientes de aire.

Por su alta variabilidad no se recomienda el uso de estropajo pintado de negro y es necesario comprobar con otros experimentos a diferentes épocas del año.

Por los análisis de eficiencia, se obtienen niveles altos a flujos de 80 y 120 y, no existiendo diferencia significativa entre ellos. Por lo anterior se sugiere realizar otro estudio el cual no incluya estropajo pintado y flujo de 40.

d. Análisis de varianza para evaluar el efecto del estropajo, flujo y ángulo sobre las eficiencias longitudinales

1. Evaluación de la igualdad u homogeneidad de varianzas

Para este análisis se utiliza una prueba de homogeneidad de varianzas mediante la prueba de Box; esta prueba sirve para evaluar la varianza de diferentes grupos de observaciones con el fin de determinar si se puede utilizar adecuadamente el análisis de varianza que nos permita ver si existen efectos e interacciones entre las variables.

De este análisis se comprueba que con las EF1, EF3 y EF4 es posible aplicar análisis de varianza (Cuadro 21), más en EF2 no se puede aplicar y es preciso realizar distintas transformaciones.

Todas las transformaciones coinciden en que no es posible realizar el análisis de varianza aun con las transformaciones consideradas. Se desconoce por lo pronto las razones de la gran variabilidad observada en EF2.

2. Interpretación de efectos e interacciones

En este análisis no se incluye el flujo a 0.40 por representar valores menores respecto a los otros niveles. En este sentido, los efectos del flujo dejarán de presentar primera importancia, permitiendo tomar decisiones respecto al uso de estropajo y el ángulo del colector.

En general, para todas las variables de eficiencia en los distintos puntos del colector, se puede decir que el mayor efecto lo produce la ausencia de estropajo, luego está el ángulo de inclinación del colector. En cuanto al ángulo de inclinación podemos decir que el ángulo de 24.61° , es decir, latitud + 10° da los mejores resultados, pudiéndose descartar los restantes ángulos de inclinación.

En cuanto a la interacción si bien existe entre todas las variables, mas ésta no es conflictiva, ya que las diferencias son en magnitud pero no en sentido cruzado de las mismas; salvo en el caso de la EF1 se tiene una interacción cruzada y esto se debe a que en esta parte del colector solar no interviene el estropajo, lo cual no preocupa.

Finalmente, de este estudio se concluye que los ángulos de 0° y 24.61° , flujos de 2.03 y $2.22 \text{ m}^3/\text{min}$ y la ausencia de estropajo producen los mejores efectos de eficiencia.

Eficiencias del colector solar obtenidas con el uso de reflectores y sin ellos

Según el Cuadro 10, se observa que hay una tendencia a incrementar la eficiencia del colector solar con el uso de reflectores a base de superficie de papel de aluminio, lo cual se esperaba, mas estadísticamente

no existe diferencia significativa ($P \leq 0.05$) entre el usar o no reflectores, esto tendría importancia desde el punto de vista económico al no hacer un gasto en la colocación de reflectores.

Ángulos de inclinación de los reflectores

Se inclinaron los reflectores solares a diferentes intervalos de tiempo, lo ideal hubiese sido hacerlo a un incremento de tiempo y horas fijas, mas por no disponer de días completamente despejados no se pudo hacer así. El Cuadro 11 presenta las respectivas horas y ángulos de inclinación de los reflectores.

La Figura 8 revela la gráfica de los ángulos de inclinación en función del tiempo tanto para horas antes del medio día como para después, los puntos se ajustan a una ecuación de regresión lineal con "r" altamente significativo ($P \leq 0.01$) y dando un incremento de ángulo/hora alrededor de 11.14° , esto tiene su importancia desde el punto de vista de diseño de colectores que requieran el uso de reflectores y conocer el ángulo de inclinación de estos a cada hora.

B. Base 2

Pruebas físicas

En esta fase de la investigación se realizaron diferentes pruebas físicas con el fin principal de buscar diferencias o no entre un secado natural o al sol, indirectamente usando el colector solar de placa plana y en horno, de las dos variedades de frijol investigadas (Jutiapan rehidratado y Carjlic recién cosechado).

Color del grano

El Cuadro 12 pone de manifiesto los diferentes tratamientos que se dio al frijol, ya sea, antes de sus tratamientos de secado (rehidratación de la variedad Jutiapan) y una vez almacenado. En general todas las muestras presentaron un color negro opaco, aspecto o cualidad muy importante desde el punto de vista de su comercialización, ya que, tiene mayor aceptación por parte del consumidor, es un frijol menos duro y menos propenso al ataque de microorganismos e insectos en relación al frijol negro brillante.

Esto demuestra en general que los diferentes tipos de secado y el almacenaje no alteraron el color de los mismos.

Color del cotiledón cocido

La interpretación visual del color, Cuadro 13, revela en todos los casos la presencia de color neutro y del color azul en general. Las muestras de cotiledón de frijol Jutiapan y Carjlic secadas indirectamente sin y con almacenamiento presentan valores bajos de color azul en comparación con el resto de muestras de cotiledores de frijol. Esto daría a pensar que existe una menor penetración de taninos de la cáscara hacia el cotiledón del frijol al momento de su cocción.

Color en caldo de cocción de frijol

El Cuadro 14 resume el color del caldo de cocción de las diferentes muestras de frijol secadas con y sin almacenamiento a los diferentes tiempos de cocción (15, 30, 60, 90, 120, 150, 180 y 210 min).

En general los valores que se observan para frijol Jutiapan a los diferentes tiempos de cocción son neutro a los 15 min, rojo y anaranjado hasta los 60 minutos y de aquí en adelante predominan el color anaranjado y en menor grado el rojo, las diferencias son mínimas en cuanto a los tratamientos de secado al natural, indirectamente y en horno; notándose así que los tratamientos de secado no influyen directamente sobre el color del caldo de cocción.

Para el caso de las muestras de frijol Jutiapan secadas y almacenadas, hay variación de valores para neutro, rojo, anaranjado y amarillo; conforme avanza el tiempo de cocción a partir de los 90 min hay predominio del color naranja y, tampoco se observan diferencias entre los tratamientos por acción del agua (rehidratación) y secado al sol, indirectamente y en estufa, como se puede notar en el Cuadro 14.

Para el caso de variedad Carjlic, la cual no tuvo tratamiento de hidratación previo al secado hay predominio de los colores neutro hasta los 90 min, seguido por el color anaranjado y rojo; pasados los 90 min domina el color anaranjado seguido por el color neutro, amarillo y rojo; las diferencias entre tratamientos de secado no son notorias ni constantes.

Dureza del frijol

El grado de dureza (Kg/mm^2) para un tiempo de cocción de 20 min de las dos variedades de frijol, con sus tratamientos de secado y con y sin almacenamiento, se muestran en el Cuadro 15, además un cuadro de grado de dureza de frijol secado en su vaina. Concretamente se puede decir que no existen diferencias significativas en el grado de dureza entre un secado

al natural y un secado indirecto mediante el uso de colector solar, mas existe una tendencia de decremento del grado de dureza del frijol Jutiapan al ser secado indirectamente y en horno, cosa igual se observa al ser este frijol almacenado mediante este tratamiento de secado.

En cuanto a la variedad Carjlic se observa que el tratamiento de secado en horno es el menos duro y el secado indirectamente es el más duro, pero estadísticamente no existe diferencia significativa ($P < 0.05$).

Al analizar la dureza de las muestras de frijol en vaina secadas, los granos que recibieron un secado indirecto son ligeramente más suaves, más estadísticamente no hay diferencia que acotar.

Tiempo de cocción

Estos valores se resumen en el Cuadro 16, si observamos los tiempos de cocción calculados mediante la "r" recta de ajuste de los puntos, para obtener un 50% de granos rotos, el frijol Jutiapan secado indirectamente presenta un menor tiempo de cocción. En el caso del frijol Carjlic también el secado indirectamente tiene un tiempo de cocción inferior al secado directamente al sol y superior al secado en estufa.

Si nos referimos al almacenaje, se observa que en general los tiempos de cocción aumentan en todos los casos, lo cual se corrobora con lo expuesto en (10) y específicamente en el caso del frijol secado indirectamente su tiempo de cocción es menor al secado al sol y mayor al secado en estufa.

Coeficiente de hidratación, porcentaje de absorción de agua y porcentaje de cáscara dura

En el Cuadro 17 se detallan parámetros. Los valores de coeficiente de hidratación y porcentaje de absorción de agua conforme pasa el tiempo de remojo tiende a incrementarse. En cuanto a los tratamientos de secado aparentemente no hay diferencias tanto para la variedad Jutiapan como Carjlic, notándose que hay una tendencia a disminuir los valores de coeficiente de hidratación en las muestras secadas al sol e indirectamente. En el caso del almacenaje esta propiedad se puede decir que tiene una ligera tendencia a disminuir sus valores o mejor sería decir que no hay un cambio sustancial.

El porcentaje de absorción de agua con el tiempo de remojo se incrementa. Refiriéndose a los tratamientos de secado en ambas variedades estudiadas sus valores no difieren.

En almacenamiento el porcentaje de absorción de agua en términos generales sus valores son muy parecidos con ligeras fluctuaciones.

Al hablar del porcentaje de cáscara dura, diremos que no hubo valor de porcentaje.

C. Fase 3

Análisis químicos

El Cuadro 18 resume los valores de humedad, taninos expresados como catequina y como condensados, actividad de polifenoloxidasas, índice de solubilidad de nitrógeno en las variedades de frijol Jutiapan y Carjlic

con los diferentes tratamientos de secado, con y sin almacenamiento.

Es de importancia destacar que tanto los valores de taninos expresados como catequina y para condensados (Hagerman), así como APFO, ISN no presentaron cambios sustanciales. Estos valores, sin embargo, disminuyen notablemente con el almacenaje, verificándose lo ya encontrado por otros autores (64).

D. Fase 4

Análisis microbiológicos

Al realizar este análisis y observando el Cuadro 19, se puede concluir que el secado indirecto y en horno arrojan el menor número de colonias microbianas, hecho de mucha importancia para poder preservar el frijol en buenas condiciones dentro del aspecto de la calidad y evitando futuras pérdidas económicas al agricultor.

E. Fase 5

Pruebas biológicas

Los valores de NPR, se exponen en el Cuadro 15, observándose que no hay cambios sustanciales entre los tratamientos de secado en las dos variedades analizadas. En cuanto al almacenamiento los valores se mantienen muy parecidos a los no almacenados, esto se comprueba por el análisis estadístico. En general los valores de NPR, se hallan alrededor de los expuestos en literatura(64).

VII. DISCUSION

A. Pruebas de Secado Solar

Según estas pruebas de secado de frijol mediante dos tratamientos y un estándar (horno), el frijol expuesto directamente a la radiación solar presenta una tendencia a bajar más la humedad que el secado indirecto con la ayuda del colector solar, mas la diferencia que se observa no es digna de considerarse, ya que se halla en el orden de la unidad o de las décimas.

Según (16, 40) los colectores solares de placa plana pueden funcionar tanto en día claro o nublado, esto se aprecia en el Cuadro 2, que tienen un secado en días por lo general nublados, debiéndose indicar que su incremento de temperatura para el aire secado es mínimo y su eficiencia se reduce notablemente de un 23.30% a un 2.00% para días despejados y nublados respectivamente.

Por lo anterior se puede decir que la velocidad de secado o remoción de agua del grano en un secado solar depende de variables como temperatura y humedad relativa del aire ambiental, intensidad de la radiación solar, humedad inicial del grano, espesor de la capa de grano en la bandeja del secador, velocidad o flujo de aire, corrientes de viento. Desde el punto de vista de laboratorio un secado en horno presenta variables que son muy controladas, mas en las pruebas experimentales al aire libre éstas cambian por las condiciones expuestas arriba, se piensa que los datos obtenidos en esta investigación sí pueden aprovecharse para poder inferir conclusiones de utilidad práctica en el funcionamiento de colectores solares, para

secar frijol y granos en general. Además la temperatura de secado detectada experimentalmente del aire al salir del colector solar no pasa de los 40°C en promedio, temperatura que no altera la calidad de un alimento, ya que altas temperaturas en el caso de granos causan agrietamientos y decoloración (40).

Tiempo de secado teórico

Vemos que el cálculo del tiempo de secado teórico mediante la ecuación exponencial que se aplica, es mayor con relación a los datos de tiempo de secado experimentales, esto puede deberse a que esta fórmula si bien es cierto se aplica a capas delgadas de grano, la capa de frijol experimental en este caso (1 cm de espesor), resulta muy delgada, además de acuerdo a las gráficas de secado los puntos se ajustan a la ecuación de una recta ($P \angle 0.01$), y sabemos que el tiempo de secado en el período decaente tiene una parte recta y otra curva o asintótica, y en esta última parte es cuando por fenómenos complejos de difusibilidad el tiempo de secado se incrementa, por esto la parte experimental presenta un tiempo menor que el teórico.

Cálculo de la eficiencia del secado solar

Como ya se expuso antes, la eficiencia del secado solar concuerda con datos de la literatura (40), mas en lo referente a la eficiencia ésta durante días nublados baja. Esta eficiencia es una relación entre la energía utilizada en el secamiento del frijol y la energía solar que recibe el sistema.

Cálculo de la eficiencia del colector solar de placa plana

Es de anotar que las eficiencias acotadas en el Cuadro 20 son altas con relación a las eficiencias que se obtuvieron al detectar la temperatura del aire al final del colector solar colocadas las termopares en 3 partes equidistantes del ancho del gabinete de secado. Lo primero se debe que al inicio de la experimentación se determinó la temperatura mediante los termopares colocados al extremo lateral de la pared del colector, pared recubierta de plancha absorbente de energía solar y con alta temperatura, influenciando de este modo que en esta sección el aire tenga su mayor temperatura que en la parte central del colector.

La posición del colector solar de norte a sur como su ángulo de inclinación (latitud + 10°) concuerda con la literatura (60). La eficiencia del colector solar de placa plana en promedio fue de 8.95%, lo que es un valor bajo con relación a la eficiencia mencionada en otros artículos (39, 40). Para colectores de placa plana que funcionen con aire los valores oscilan entre 20 y 40%.

Este valor bajo de eficiencia se debe en gran parte a las pérdidas de calor en el colector a través de la cubierta de polivinilo hacia la atmósfera por convección y radiación.

También es importante la velocidad del viento que según datos de INSIVUMEH para los días de secado en promedio se obtuvo vientos de hasta 5.0 m/seg, que favorecen las pérdidas por convección a través del polivinilo (cubierta).

La presencia de polvo o smog sobre la cubierta ocasiona pérdidas de la radiación solar hacia la placa absorbente.

Otro factor es la falta de un buen sellado entre la cubierta y el colector.

La eficiencia del secado solar se puede ver disminuida por pérdidas de calor, especialmente en la unión entre el colector y el gabinete de secado.

También por el diseño en sí del colector y su unión al gabinete de secado la velocidad del aire se ve disminuida notablemente de 317 m/min a 125.7 m/min a la entrada al gabinete de secado y la salida del grano presentó 0.6 m/min.

Según (48) normalmente las eficiencias de secado son mayores a mayor altura de camada de grano, pues hay mayor transferencia de humedad del grano hacia el aire de secamiento, en el presente trabajo la altura de camada es pequeña. Esto redundaría en una mayor eficiencia de secado con una mayor carga de frijol en trabajos futuros.

B. Pruebas Físicas

En cuanto a las diferentes pruebas físicas como color del grano, del cotiledón, caldo de cocción, dureza, tiempos de cocción, coeficiente de hidratación, porcentaje de absorción de agua, porcentaje de cáscara dura, se ha hablado mucho en trabajos de Elías, Bressani, Mejía, cuyas teorías tienen gran fundamento. Al presente trabajo escapa el hecho de analizar a fondo estas propiedades, por lo que se hará un estudio objetivo y

práctico de lo sucedido con las muestras de frijol Jutiapan y Carjlic al ser expuestos o no a la radiación solar.

En el caso de la dureza determinada como Kg fuerza/mm², para el caso de la muestra Jutiapan dividimos en dos partes, uno el efecto de la adición de agua de remojo a la muestra y dos la acción de los tratamientos de secado. Mediante prueba de significancia de Tukey, podemos decir que en las muestras secadas en el campo de cultivo y rehidratadas no existe diferencia significativa al nivel del 5%; lo mismo podemos decir de las muestras secadas al sol indirectamente y en horno.

Con las muestras almacenadas la tendencia entre ellas es igual a las no almacenadas, no existe diferencia significativa tanto por efecto de adición de agua como por tratamiento de secado. Esto pone de manifiesto que las muestras al ser almacenadas tuvieron una tendencia algo similar a las no almacenadas.

Con la muestra Carjlic al analizar la diferencia significativa entre tratamientos de secado y muestra recién cosechada no hay diferencia significativa a nivel de 5%, es decir, se corrobora con la anterior variedad de frijol.

También se determinó la dureza de frijol secado dentro de su vaina al natural, indirectamente y en horno; sólo hay diferencia significativa ($P \leq 0.05$) entre las muestras secadas al natural e indirectamente con la muestra secada en horno, en este caso la muestra de frijol en vaina presenta la menor dureza.

Para el tiempo de cocción por tener un solo valor para cada tiempo de cocción no se puede hacer inferencias estadísticas, mas en general se estima que no hay variaciones sustanciales entre tratamientos y en relación a almacenaje.

En cada caso del tiempo de cocción la tendencia general de los puntos es asintótico al inicio, luego el porcentaje de granos rotos asciende violentamente y tiende a estabilizarse asintóticamente. Al hacer la regresión lineal se observa una alta linearidad con "r" altamente significativo ($P \leq 0.01$). Para tener una mejor estimación del tiempo de cocción t para las dos variedades y tratamientos de secado en conjunto, se procedió a calcular una regresión lineal ponderada de la función logística; con esto se logra que los extremos de la curva tengan menos importancia, ya que, son asintóticos y homogenizar la variabilidad de las observaciones. Nos interesa la parte comprendida entre los extremos asintóticos y específicamente de 50%, para tener el tiempo de cocción teórico. La Figura 9 representa la ecuación exponencial a la cual se ajustan los 112 valores originales de porcentaje de granos rotos en función del tiempo de cocción:

$$\hat{p} = \frac{e^{y'}}{1 + e^{y'}} \quad (25)$$

donde y' es estimación del porcentaje de granos rotos en escala logística, luego

$$y' = \ln \frac{\%}{1 - \%} = \ln \frac{\% \text{ de granos rotos}}{\% \text{ de granos no rotos}}$$

Finalmente arribamos a la regresión lineal ponderada de la transformación logística $y' = -8.093968 + 0.075733X$, $r = 0.837$, donde x es el tiempo de cocción.

C. Análisis Químicos

Según el Cuadro 18 vemos que los valores de taninos expresados como catequina tanto para la variedad Jutiapan y Carjilc, se hallan dentro de los márgenes estipulados en trabajos de Bressani, Elfas y Rizo (6, 64) para frijol. Se observa que las muestras antes de ser sometidas al proceso de secado su valor de catequina es alto y una vez realizado el proceso de secado este valor disminuye, es decir, hay una interacción o condensación de los taninos. Se nota que entre tratamientos de secado no existe una marcada diferencia especialmente para la variedad Carjilc.

Los valores de polifenoles condensados expresados por el método de Hagerman son notoriamente inferiores a los expresados como catequina; el valor es alto en las muestras antes de ser sometidas al secado y bajo después de este proceso. Para las dos variedades estudiadas no hay diferencia entre tratamientos de secado en sus valores.

Al referirnos al almacenamiento para el caso de taninos expresados como catequina y por Hagerman los valores caen, corroborando lo manifestado en (9, 64) especialmente para valores de catequina. El método de Hagerman se basa en la precipitación de la proteína mediante el ácido tánico (32), se diría que al ser almacenado el frijol el ácido tánico reacciona con proteínas dando diferentes complejos y es por esto que sus valores disminuyen.

En cuanto a la actividad de la polifenoloxidasa (APFO) vemos fundamentalmente que es mayor en muestras frescas de frijol y disminuye con los tratamientos de secado; además, se puede decir con respecto al tratamiento que los valores presentan una ligera disminución. Entre tratamientos de secado no existe una diferencia digna de ser tomada en cuenta y las variaciones son pequeñas.

Los valores de índice de solubilidad de nitrógeno (ISN), en cuanto a tratamientos de secado no muestran diferencia significativa para las dos variedades, sin embargo, en cuanto al almacenamiento los valores disminuyen tal como se expresa en (64).

D. Análisis Microbiológicos

Es de recalcar el hecho que microbiológicamente un secado indirecto sea mediante el uso del colector solar o en horno, presenta la menor contaminación microbiana, aspecto de gran importancia, ya que esto contribuye a mantener el frijol en muy buen estado y con un mayor tiempo de conservación.

E. Pruebas Biológicas

Los valores NPR de las variedades analizadas y sus respectivos tratamientos de acción de agua, secado y almacenamiento no difieren significativamente a nivel de 5%, más la única diferencia que existe es con el estándar a base de caseína + 0.3% de metionina, cuyos valores de NPR son prácticamente el doble del valor observado para las diferentes dietas. Esto implica que la acción de una rehidratación, secado y almacenamiento en esta investigación no acusó cambio sustancial en el NPR del frijol.

VIII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Siendo el frijol un alimento básico en muchos países de América Latina y presentando un problema muy digno de considerarse como es su dureza, lo cual ocasiona incrementos en tiempos de cocción y, por ende, consumo de energía de diversos tipos, se realizó este trabajo con el fin de ver si un tratamiento de secado indirecto (menos drástico) contribuye a disminuir este problema.

A. Conclusiones

1. Las eficiencias bajas obtenidas en el colector solar pudieron ocurrir principalmente por convección y radiación en la cubierta de polivinilo, la acción de las corrientes de viento, fugas de aire entre cubierta y colector solar y, en el acople secadero-colector. Esto último se puede mejorar con un buen diseño.
2. Se puede secar frijol hasta su contenido de humedad óptimo para almacenamiento tanto en días despejados como nublados, dependiendo el mayor o menor tiempo de secado de las condiciones ambientales reinantes.
3. Se debe trabajar a un mayor flujo de aire, para obtener un menor tiempo de secado. Según lo expuesto, la pérdida de velocidad de aire es grande y esto contribuye a disminuir la eficiencia del secado.

4. Estadísticamente a nivel de 5% no existen diferencias en la dureza del frijol, pero hay una tendencia a disminuir y, por ende, sus tiempos de cocción. Esto es de importancia si traducimos a gastos de energía en las formas de leña, gas o electricidad, contribuyendo a tener una economía, especialmente para los estratos sociales bajos, y evitando pérdidas mayores en su calidad nutritiva.
5. Mediante los análisis no se observa la incidencia marcada de las reacciones fotoquímicas sobre el secado del frijol al natural como era de esperarse y se descartaría la hipótesis planteada que un frijol asoleado es más duro que otro no asoleado.
6. En cuanto a su almacenamiento se puede concluir que el frijol tiene poca tendencia a cambios físicos, químicos, microbiológicos y biológicos, esto está de acuerdo a lo propuesto por Morris y Wood (59) que un frijol con bajo porcentaje de humedad conserva sus características iniciales en condiciones de almacenamiento.

B. Recomendaciones

1. Mejorar el diseño del colector solar en cuanto a su construcción, ubicación y potencia del ventilador centrífugo.
2. Recomendar futuras investigaciones de frijol de diferentes variedades recién cosechadas y secándolas en épocas de mayor radiación solar como son los meses de marzo y abril.

IX. RESUMEN

Este trabajo tuvo como finalidad estudiar el endurecimiento del frijol (Jutiapan y Carjlic) al ser secado al natural y dentro de un gabinete de secado acoplado a un colector solar de placa plana y teniendo como estándar un secado en horno. También se estudió el desarrollo del mismo parámetro durante el almacenamiento en condiciones aceleradas (30°C, 60% de HR y por un tiempo de 3 meses).

Junto con la determinación de la dureza se evaluaron pruebas físicas, químicas, microbiológicas y biológicas de las dos variedades de frijol investigadas con los tratamientos de secado y almacenamiento.

Para la determinación de la evaluación del colector solar, luego de estudiar diversos parámetros, se llegó a mejores evaluaciones y con menor variabilidad en los datos con el flujo de $2.22 \text{ m}^3/\text{min}$, un ángulo de inclinación del colector de 24.61° (latitud de Guatemala + 10°) y sin el uso de estropajo.

En cuanto a las pruebas de secado solar los menores tiempos y mejores eficiencias se obtuvieron en días despejados.

Pruebas físicas como dureza, tiempo de cocción, porcentaje de absorción de agua, coeficiente de hidratación y porcentaje de cáscara dura, no presentan diferencias significativas entre tratamientos y almacenamiento a nivel del 5%, mas en cuanto a la dureza y al tiempo de cocción éstos

tienen una tendencia a disminuir en el secado indirecto y en horno.

Similar observación se puede hacer para los análisis químicos y biológicos ya que entre los tratamientos de secado y almacenaje no existen diferencias significativas ($P \leq 0.05$).

En cuanto a pruebas microbiológicas un secado en gabinete u horno presenta la menor contaminación que el secado al natural.

X. BIBLIOGRAFIA

1. Alcah , B. "El papel de los taninos y polifenoles asociados, sobre el mecanismo de endurecimiento del frijol común (Phaseolus vulgaris) durante el almacenamiento". Tesis-Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, Guatemala, 1981. 66 p.
2. Antunes, P.L. y V.C. Sgarbieri. "Influence of time and conditions of storage on technological and nutritional properties of a dry bean (Phaseolus vulgaris). Variety Rosinha G2". J. Food Sci., 44:1703-1706. 1979.
3. Association of Official Agricultural Chemists, Washington, D.C. Official Methods of Analysis of the A.O.A.C. 1th ed. Washington, D. C. 1970. 1094 p.
4. A.O.C.S. Soybeans: Chemistry and Technology. Nitrogen Solubility Index (INS). 1969. pp. 451-452.
5. Bereny, J.H. Solar Energy Information Services, USA. 1979. p. 107.
6. Bern, G.J.; L.D. Forsen, M. Patton y M.E. Anderson. Stir drying corn with solar heated air, solar grain drying Conference Proceedings. March 27-28. 1979. Ames, Iowa. pp. 95-108.
7. Berry, R.E. Proceedings of symposium on solar food processing. United States Department of Agricultura Science and Education Administration; Federal Research, 1979. 70 p.
8. Bressani, R. "Legumes in human diets and how they might be improved" Nutritional improvement of food legumes by breeding. Based on proceedings of a symposium sponsored by the Protein Advisory Group PAG, held at the Food & Agricultura Organization from the 3rd-5th of July in Rome, Italy. Edited by Max Milner. John Wiley and Sons Inc., New York, 1975. pp. 15-42.
9. _____ y L.G. Elfas. The nutritional role of polyphenols in beans. En: Polyphenols in cereals and legumes: Proceedings of a symposium held during the 36th annual meeting of the Institute of Food Technologists. St. Louis Missouri, 10-13 June, 1979. Ed. Joseph Hulse. Ottawa, Ontario, IDRC, 1980. pp. 61-80.
10. _____; R.M. Flores y L.G. Elfas. "Aceptabilidad y valor nutricional de las plantas leguminosas de grano en la dieta humana". En: Seminario sobre el "Potencial del Frijol y de Otras Leguminosas de Grano Comestible en América Latina". Cali, Colombia, 26 de febrero - 1 de marzo, 1973. Cali, Colombia, Centro Internacional de Agricultura Tropical, CIAT/1975/ pp. 17-48 (Serie CS-2).

11. Brinkworth, B.J. Energía solar para el hombre. /Trad. del inglés por Rafael Flores/ Madrid, Ediciones H. Blume /c 1981/ 244 p.
12. Brooker, D., F.W. Bakker y C. Hall. Drying Cereal Grains. The AVI Publishing Company, Inc. 1974. USA. 265 pp.
13. Clyde, M.C. y H.H. Kauffmann. Grain storage. University of Minneapolis Minnesota Press, 1969. pp. 99-100.
14. Compton, C. Introducción a la Química. Editorial Unión Tipográfica Hispanoamericana. México, 1965. p. 306.
15. Charm, S. The Fundamentals of Food Engineering. Third Edition. AVI Publishing Company, Inc. c. 1978. USA. pp. 299-408.
16. Daniels, F. Uso directo de la energía solar. /Trad del inglés por Enrique Zoído/ Madrid, Ediciones H. Blume /3rd ed. 1981/ 301 p.
17. Díaz, M.L. Obtención experimental de constantes de secado para variedades de maíz guatemalteco. Tesis de grado. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería. 1980. pp. 9-33.
18. Donald, W.R. Portable, multipurpose solar collectors. Solar grain drying Conference Proceedings, March 27-28, 1979. Ames, Iowa. pp. 87-94.
19. Duffie, J.A. y D.A. Beckman. Solar energy thermal processes. A Wiley Interscience Publication. /c 1974/ USA. 385 p.
20. Elías, L.G. y R. Bressani. "Evaluación de estándares tecnológicos de 34 variedades de frijol (*Phaseolus vulgaris*). Informe Anual, INCAP. 1979. pp. 11-12.
21. _____; R. Bressani y D. Navarrete. "Nutritive value of Central American beans. IV. The essential amino acid content of samples of black beans, red beans, rice beans and cowpeas of Guatemala". J. Food Sci., 26(5):525-528. 1961.
22. _____; Cristales, R. Bressani y H. Miranda. Composición química y valor nutritivo de algunas leguminosas de grano. Turrialba, 26(4):375-380. 1976.
23. Enciclopedia Barsa. Tomo XIII. 1970. USA. p. 400.
24. _____ Salvat Diccionario. Tomo 11, Salvat Editores, S.A., España, 1973. p. 3059.
25. Finney, D.J. Statistical Methods in Biological Assay. Edition Griffin, London 1964. 668 p.

26. Flukey, W.H. y J.S. Jen. "Peroxidase and polyphenol oxidase activities in developing peaches". J. Food Sci., 43:1826-1831. 1978.
27. Gloyser, W.G. "Sclerema and hardshell, two types of hardness of beans". Proc. Am. Assoc. Offic. Seed. Analyst., 13:60-64. En M.C. Bourne "Size Density and hardshell in dry beans" Food Tech., 10(5):225-229. 1956.
28. Gómez Brenes, R., A. Swetman y R. Bressani. "Extracción, fraccionamiento e identificación de los polifenoles del frijol (Phaseolus vulgaris)" Informe Anual, INCAP. 1980. pp. 26-28.
29. González, G. Métodos Estadísticos y Principios de Diseño Experimental. Universidad Central del Ecuador-Quito. 1974. 331 p.
30. Gramajo, A.N. Optimización de secadores solares indirectos por convección natural para granos básicos, utilizando el modelo logarítmico de secado. Tesis de grado. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería. 1982. 53 p.
31. Gupta, R.K. y E. Haslan. "Vegetable tannins-structure and biosyntheses. Polyphenols in cereals and legumes; proceedings of a symposium held during the 36th annual meeting of Food Technologists, St. Louis Missouri, 13-16 June, 1979. Ed. Joseph Hulse. pp. 15-24.
32. Hagerman, A.E. y L.G. Butler. "Protein precipitation method for the quantitative determination of tannins". J. Agric. Food Chem., 26(4):809-811. 1978.
33. Halacy, D.S. La nueva era de la energía solar. New York, Academic Press Inc. 1966. pp. 32-38.
34. Halsman, E. Chemistry of vegetable tannins. New York, Academic Press Inc. 1966. pp. 32-38.
35. Heldman, D. y R.P. Singh. Food Process Engineering. Second Edition. AVI Publishing Company, Inc. C. 1981. USA. 415 p.
36. Hellendoorn, E.W. "Intestinal effects following ingestion of beans". Food Technol., 23(6)87-92. 1969.
37. Henderson y Perry. Agricultural Process Engineering. Third Edition, AVI, 1980. p. 239.
38. Hernández, E. "Significado de la presencia de taninos y polifenoles asociados en la digestibilidad de las proteínas del frijol (Phaseolus vulgaris) en humanos". Tesis (magister Scientificalae)-Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia- INCAP/CESNA. Curso de Postgrado en Ciencias y Tecnología de Alimentos 1980. 66 p.

39. Hellickson, M.A. Solar Energy for Agriculture. Department of Agricultural Engineering. South Dakota State University, 1980. 13 p.
40. Instituto Centroamericano de Investigación y Tecnología Industrial. Utilización de secadores solares para la preservación de granos. Presentado por el ICAITI a Banco Internacional de Desarrollo (BID). Guatemala, 1981. 199 p.
41. Instituto de Nutrición de Centro América y Panamá (INCAP). Encuesta Dietética de Guatemala. 1981. Informe Anual. 176 p.
42. International Development Research Centre. Nutritional standards and methods of evaluation for food legume breeders. Editors, J.H. Hulse, K.O. Rachie y L.W. Billingsley. Canada. 1977. 100 p.
43. Jaffé, W.G. Las semillas leguminosas como fuentes de proteína en América Latina. En: Recursos proteínicos en América Latina. /Editado por el/ INCAP. Guatemala, 1971. pp. 228-241.
44. Keener, H.M.; OIA. Sabbah, G.E. Meyer y W.L. Roller. Plastic film solar collectors for grain drying. J. Article No. 14-77. Ohio Agricultural Research and Development Center. pp. 56-77.
45. Kline, G.L. Solar collector types and performance, Solar grain drying Conference Proceedings, March 27-28. Ames, Iowa. 1977. pp. 11-13.
46. Kreider, J.F. Medium and high temperature solar processes. Editado por Jesse Denton. Academic Press. London, 1979. pp. 1-99.
47. Kon, S. "Pectic substances of dry beans and their possible correlation with cooking time". J. Food Sci., 33:437-438. 1968.
48. León, J.F. Secado solar de granos con aire forzado a escala grande. Tesis de Grado. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería. 1981. pp. 42-51.
49. Linares, S. y C. de Bosque. "Evaluación de estándares nutricionales y tecnológicos de 20 variedades de frijol". Tesis (Magister Scientifical)-Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia-INCAP/CESNA-Curso de Postgrado en Ciencia y Tecnología de Alimentos. Guatemala, 1979. 112 p.
50. Lolas, G.M. y P. Markakis. "The phytase of navy beans (Phaseolus vulgaris)". J. Food Sci., 42:1094-1106. 1977.
51. Masterton, W.L. y E.J. Slowinski. Química General Superior. Editorial Interamericana, S.A., México. 1966. p. 87.
52. Mattson, S. "The cookability of yellow pea, a colloid chemical and biochemical study". Acta Agric. Suecana., 2:185-231. 1946. (Original no consultado; compendado en J. Sci. Food Agr., 18:292-295. 1946).

52. Mattson, S. "The cookability of yellow pea, a colloid chemical and biochemical study". *Acta Agric. Suecana.*, 2:185-231. 1946. (Original no consultado; compendiado en J. Sci. Food Agr., 18: 292-295. 1946).
53. McGill University Faculty of Engineering. Brace Research Institute. How to make a solar cabinet dryer for agricultural produce. Canada. 1973. pp. 1-14.
54. McVeigh, C. Sun power. An introduction to the applications fo solar energy. Inglaterra. 1978. 208 p.
55. Mejfa, E. de. "Efecto de diferentes condiciones de almacenamiento sobre el desarrollo de la dureza del frijol". Presentado en: El problema del endurecimiento del frijol común (Phaseolus vulgaris), celebrado durante la XXXVI Reunión Anual del Programa Cooperativo Centroamericano para el Mejoramiento de Cultivos Alimenticios (PCCMCA). Santo Domingo, República Dominicana, marzo 23-27, 1981. Guatemala, INCAP, 1981. 20 p. (Mimeografiado).
56. Merrill, R. y T. Gage. Energy Primer, solar, water, wind and bio-fuels. Edit. USA 1978. pp. 30-55.
57. Miller, M.W. Solid desiccant regeneration by direct solar energy for fresh fruit drying. *Agricultural Energy Vol. 3. Food Processing. Selected papers and abstracts from the 1980. ASAE National Energy Symposium.* pp. 581-585.
58. Molina, M.R.; M.A. Baten, R. Gómez, K.W. Kind y R. Bressani. "Heat treatment; a process to control the development of the hard to cook phenomenon in black beans (Phaseolus vulgaris)". J. Food Sci., 41:661-666. 1979.
59. Morris, H.J. y E.R. Wood. "Influence of moisture content on keeping quality of dry beans". Food Tech., 10(5):225-229. 1956.
60. ONUDI: Tecnología para aprovechar la energía solar. Serie "Desarrollo y transferencia de tecnología". No. 5, USA. 1979. 170 p.
61. Potter, N.N. La ciencia de los alimentos. /Trad. del inglés. Edit. Edutex por A. Yates/. México. Edit. EDUTEX /c 1973/. 749 p.
62. Premis, J. Energy book. No. 1 - Natural Sources & Backyard applications, USA. 1975. p. 64.
63. Price, M.L.S., S.V. Scoyoc y L.G. Buttler. A critical evaluation of the vanillin reaction as an assay for tannin in sorghum grain. J. Agr. Food Chem., 26(5):1214-1218. 1978.

64. Rizo, M. "Estudio sobre el uso de soluciones de NaCl para el control del endurecimiento y del biodeterioro del frijol común (Phaseolus vulgaris) y del caupí (Vigna sinensis)". Tesis (Magister Scientificaе)-Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia-INCAP/CESNA, Curso de postgrado en Ciencias y Tecnología de Alimentos. Guatemala. 1981. 77 p.
65. Roa, G.W. e I. Macedo. Secagem de Graos em Silos com Energia Solar. UNICAMP. Brasil. 1981. 19 p.
- 66' Roa, G. y L.G. Villa. Secagem e armazenamento de graos e sementes em silos mediante a utilizacao de air ambiente e com auxilio de colectores solares. Universidad Estadual do Campinas, Grupo de energia, Brasil. 1977. 51 p.
67. Ruiloba, E. de. "Efecto de diferentes condiciones de almacenamiento sobre características físico-químicas y nutricionales del frijol (Phaseolus vulgaris)". Tesis (Magister Scientificaе)-Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia-INCAP/CESNA. Curso de Postgrado en Ciencia y Tecnología de Alimentos. Guatemala. 1973. 90 p.
68. Salazar, H.R. Estudio sobre algunas características de la energía solar en Guatemala. Proyecto de Investigación y Energía no Convencionales. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos Guatemala. 1978. 57 p.
69. Schmidt-Hebbel, H. Ciencia y tecnología de los alimentos, Chile. 1973. pp. 140-142.
70. Sharing the sun solar technology in the seventies. Joint Conference American Section, International Solar Energy Society of Canada, INC. Vol. 2 Solar Collectors, 1976. pp. R1-R5.
71. Snedecor, G.W. y G.W. Cochran. Métodos Estadísticos. Compañía Editorial Continental, S.A., México. 1978. 703 p.
72. Takayama, K.K.; Muneta, P. y A.c. Wiese. "Lipid composition of dry beans and its correlation with cooking time". J. Agr. Food Chem., 13:269-272. 1965.
73. The United Nations University World Hunger Programme Food and Nutrition Bulletin. Supplement 4. Nutritional evaluation of protein foods. Edited by Peter L. Pellett y Vernon R. Young. UNU. 1980. 154 p.
74. Van Arsdel, W.; M. Copley y A.I. Morgan. Food dehydration. 2nd ed. Vol. 1. AVI. 1973. 347 p.

XI. APENDICES

CUADRO 1

PRUEBAS DE SECADO SOLAR: PARAMETROS CONTROLADOS EN EL SECADO DE FRIJOL JUTIAPAN

| Parámetros | Días de secado | | | | | |
|--|----------------|---------|-----------|---------|---------|--|
| | 4-V-82 | | 8-V-82 | | 26-V-82 | |
| Condiciones del cielo | Despejado | | Despejado | | - | |
| Tipo de secado | N | I | N | I | E | |
| Temperatura promedio del aire ambiental °C | 30.0 | 30.0 | 27.0 | 27.0 | 40.0 | |
| Temperatura promedio de bulbo húmedo °C | 17.6 | 17.6 | 17.6 | 17.6 | - | |
| Temperatura promedio del aire al salir del colector °C | - | 34.2 | - | 31.0 | - | |
| Temperatura promedio de la superficie del grano °C | 40.9 | 34.0 | 32.2 | 30.0 | - | |
| Humedad inicial del grano % | 19.36 | 19.36 | 19.36 | 19.36 | 19.36 | |
| Humedad final del grano % | 11.68 | 12.84 | 10.80 | 12.14 | 11.57 | |
| Humedad relativa promedio % | 30.00 | 30.00 | 44.00 | 44.00 | - | |
| Calor de vaporización del agua en el grano BTU/lb | - | 1178.9 | - | 1204.6 | - | |
| Cantidad de agua evaporada Kg/m ² | 0.66 | 0.56 | 0.74 | 0.62 | 0.67 | |
| Cantidad de radiación solar recibida Kcal | 1619.7 | 14227.2 | 1332.0 | 11700.0 | - | |
| Tiempo experimental de secado h - min | 6 -38 | 6 -38 | 6 -57 | 6 -57 | 13 -20 | |

N = Al natural I = Indirecto E = Horno

* Temperatura en el interior del horno

CUADRO 2

PRUEBAS DE SECADO SULAK: PARAMETROS CONTROLADOS EN EL SECADO DE FRIJOL CARJLIC (DURANTE 3 DIAS)

| Parámetros | Días de secado | | | | | |
|---|-------------------|---------|---------|--------|-------------------|--------|
| | 1-IX-82 | | 2-IX-82 | | 3-IX-82 | |
| Condiciones del cielo | Parcialmente nub. | | Nublado | | parcialmente nub. | |
| Tipo de secado | N | I | N | I | N | I |
| Temperatura promedio del aire ambiental °C | 23.6 | 23.6 | 23.9 | 23.9 | 25.4 | 25.4 |
| Temperatura promedio de bulbo húmedo °C | 19.4 | 19.4 | 19.3 | 19.3 | 17.8 | 17.8 |
| Temperatura promedio del aire al salir del colector | - | 28.0 | - | 27.0 | - | 31.2 |
| Temperatura promedio de la superficie del grano °C | 35.1 | 29.4 | 34.6 | 30.4 | 41.0 | 31.7 |
| Humedad inicial del grano % | 18.74 | 18.74 | - | - | - | - |
| Humedad final del grano % | - | - | - | - | 10.24 | 10.42 |
| Humedad relativa promedio % | 68.0 | 68.0 | 69.0 | 69.0 | 50.0 | 50.0 |
| Calor de vaporización del agua en el grano BTU/lb | - | - | - | - | - | 1176.8 |
| Cantidad de agua evaporada Kg/m ² | - | - | - | - | 0.74 | 0.93 |
| Cantidad de radiación solar recibida Keal | 1289.4 | 11325.6 | 1129.5 | 9921.6 | 911.6 | 8002.8 |
| Tiempo experimental de secado h - min | - | - | - | - | 16 -31 | 16 -31 |

N = Al natural I = Indirecto.

CUADRO 3

PRUEBAS DE SECADO SOLAR: PARAMETROS CONTROLADOS EN SECADO DE FRIJOL CARJLIC EN HORNO
(DURANTE 2 DIAS)

| Parámetros | Días de secado | |
|---|----------------|---------|
| | 4-IX-82 | 5-IX-82 |
| Temperaturas en el interior del horno, °C | 39.4 | 38.4 |
| Temperatura promedio de superficie de grano, °C | 38.1 | 37.4 |
| Humedad relativa promedio, % | 60.0 | 60.0 |
| Humedad inicial del grano, % | 18.42 | - |
| Humedad final del grano, % | - | 9.76 |
| Humedad de agua evaporada, Kg/m ² | - | 0.75 |
| Tiempo experimental de secado, h-min | - | 14 -30 |

CUADRO 4

PRUEBAS DE SECADO SOLAR: PARAMETROS CONTROLADOS EN EL SECADO DE FRIJOL CARJLIC (DURANTE 2 DIAS)

| Parámetros | Días de secado | | | |
|---|----------------|--------|---------|---------|
| | 14-X-82 | | 15-X-82 | |
| Condiciones del cielo | Despejado | | Nublado | |
| Tipo de secado | N | I | N | I |
| Temperatura promedio del aire ambiental, °C | 25.0 | 25.0 | 21.9 | 21.9 |
| Temperatura promedio del bulbo húmero, °C | 17.4 | 17.4 | 17.2 | 17.2 |
| Temperatura promedio del aire al salir del colector, °C | - | 31.5 | - | 23.0 |
| Temperatura promedio de la superficie del grano, °C | 41.8 | 34.0 | 30.3 | 24.0 |
| Humedad inicial del grano, % | 17.28 | 17.28 | - | - |
| Humedad final del grano, % | - | - | 12.21 | 12.41 |
| Humedad relativa promedio, % | 56.0 | 56.0 | 65.0 | 65.0 |
| Calor de vaporización del agua en el grano, BTU/lb | - | - | - | 1205.9 |
| Cantidad de agua evaporada, Kg/m ² | - | - | 0.44 | 0.42 |
| Cantidad de radiación solar recibida Kcal. | 1364.0 | 8002.8 | 666.0 | 11980.8 |
| Tiempo experimental de secado, h-min | - | - | 9 -22 | 9 -22 |

N = Al natural I = Indirecto

CUADRO 5

PRUEBAS DE SECADO SOLAR: PARAMETROS CONTROLADOS EN SECADO DE FRIJOL CARJLIC (DURANTE 3 DIAS)

| Parámetros | Días de secado | | | | | |
|---|----------------|--------|-------------------|---------|-------------------|---------|
| | 20-X-82 | | 22-X-82 | | 23-X-82 | |
| Condiciones del cielo | Nublado | | Parcialmente nub. | | Parcialmente nub. | |
| Tipo de secado | N | I | N | I | N | I |
| Temperatura promedio del aire ambiental, °C | 23.1 | 23.1 | 22.2 | 22.2 | 22.2 | 22.2 |
| Temperatura promedio del bulbo húmedo, °C | 17.2 | 17.2 | 15.6 | 15.6 | 15.9 | 15.9 |
| Temperatura promedio del aire al salir del colector, °C | - | 24.6 | - | 26.0 | - | 26.8 |
| Temperatura promedio de la superficie del grano, °C | 28.7 | 24.8 | 33.0 | 28.4 | 32.5 | 28.0 |
| Humedad inicial del grano, % | 18.76 | 18.76 | - | - | - | - |
| Humedad final del grano, % | - | - | - | - | 10.80 | 10.80 |
| Humedad relativa promedio, % | 58.0 | 58.0 | 51.0 | 51.0 | 55.0 | 55.0 |
| Calor de vaporización del agua en el grano, BTU/lb | - | - | - | - | - | 1186.0 |
| Cantidad de agua evaporada, Kg/m ² | - | - | - | - | 0.69 | 0.69 |
| Cantidad de radiación solar recibida, Kcal | 293.0 | 2574.0 | 1321.3 | 11606.4 | 1491.8 | 13104.0 |
| Tiempo experimental de secado, h-min | - | - | - | - | 17 -10 | 17 -10 |

N = Al natural I = Indirecto

CUADRO 6

PRUEBAS DE SECADO SOLAR: RESUMEN DE VALORES DE HUMEDAD EN BASE SECA
Y TIEMPO DE SECADO DE FRIJOL CARJLIC

| Días de Secado | | | | | | | | | | | |
|----------------|------|---------------|-----------|-----|---------------|------------|-----|---------------|---------------|------|---------------|
| 1,2,3-IX-82 | | | 4,5-IX-82 | | | 14,15-X-82 | | | 20,22,23-X-82 | | |
| HBS | | Tiempo min | HBS | | Tiempo min | HBS | | Tiempo min | HBS | | Tiempo min |
| N | I | | E | | | N | I | | N | I | |
| 0.23 | 0.23 | 0 | 0.22 | 0 | 0.21 | 0.21 | 0 | 0.23 | 0.23 | 0 | |
| 0.21 | 0.22 | 53 | 0.22 | 30 | 0.21 | 0.20 | 64 | 0.21 | 0.21 | 50 | |
| 0.19 | 0.21 | 68 | 0.21 | 60 | 0.20 | 0.19 | 104 | 0.21 | 0.21 | 85 | |
| 0.20 | 0.22 | 78 | 0.20 | 90 | 0.19 | 0.18 | 138 | 0.21 | 0.20 | 115 | |
| 0.20 | 0.22 | 90 | 0.20 | 120 | 0.18 | 0.18 | 164 | 0.20 | 0.20 | 150 | |
| 0.20 | 0.21 | 115 | 0.19 | 150 | 0.17 | 0.16 | 204 | 0.19 | 0.20 | 180 | |
| 0.17 | 0.19 | 185 | 0.19 | 180 | 0.16 | 0.16 | 250 | 0.20 | 0.18 | 210 | |
| 0.17 | 0.19 | 235 | 0.17 | 280 | 0.15 | 0.16 | 317 | 0.19 | 0.18 | 240 | |
| 0.17 | 0.19 | 261 | 0.17 | 300 | 0.14 | 0.15 | 377 | 0.18 | 0.18 | 310 | |
| 0.16 | 0.18 | 290 | 0.16 | 330 | 0.16 | 0.15 | 467 | 0.17 | 0.16 | 360 | |
| 0.15 | 0.18 | 330 | 0.16 | 360 | 0.14 | 0.15 | 527 | 0.16 | 0.14 | 440 | |
| 0.15 | 0.18 | 370 | 0.15 | 393 | 0.14 | 0.14 | 562 | 0.14 | 0.15 | 490 | |
| 0.16 | 0.17 | 405 | 0.15 | 420 | - | - | - | 0.14 | 0.15 | 520 | |
| 0.18 | 0.18 | 432 | 0.15 | 450 | - | - | - | 0.14 | 0.14 | 547 | |
| 0.17 | 0.17 | 518 | 0.14 | 480 | - | - | - | 0.14 | 0.14 | 580 | |
| 0.15 | 0.14 | 590 | 0.12 | 510 | - | - | - | 0.15 | 0.14 | 620 | |
| 0.13 | 0.14 | 630 | 0.12 | 570 | - | - | - | 0.14 | 0.14 | 675 | |
| 0.13 | 0.14 | 675 | 0.12 | 600 | - | - | - | 0.14 | 0.14 | 735 | |
| 0.12 | 0.14 | 705 | 0.12 | 630 | - | - | - | 0.13 | 0.13 | 795 | |
| 0.12 | 0.12 | 790 | 0.12 | 705 | - | - | - | 0.12 | 0.13 | 855 | |
| 0.13 | 0.13 | 835 | 0.12 | 720 | - | - | - | 0.12 | 0.12 | 915 | |
| 0.13 | 0.12 | 867 | 0.12 | 780 | - | - | - | 0.12 | 0.12 | 975 | |
| 0.13 | 0.13 | 910 | 0.11 | 815 | - | - | - | 0.12 | 0.12 | 1030 | |
| 0.11 | 0.12 | 991 | 0.10 | 840 | - | - | - | | | | |
| | | | 0.11 | 870 | - | - | - | | | | |

N = Secado al natural
I = Secado indirecto
E = Secado en Horno

CUADRO 7

PRUEBAS DE SECADO SOLAR: CALCULO DE LA EFICIENCIA DEL COLECTOR SOLAR DE

PLACA PLANA $E = \frac{M \cdot C_p \cdot \Delta T^*}{I_G \cdot A}$

| Fecha* | I_G^{**} $\frac{\text{cal}}{\text{min} \cdot \text{cm}^2}$ | C_p Kcal/Kg°C | δ Kg/m ³ | T °C | Eficiencia % |
|---------|---|--------------------|-------------------------------|---------|--------------|
| 4-V-82 | 0.87 | 0.245 | 0.976 | 4.2 | 7.85 |
| 8-V-82 | 0.85 | 0.245 | 0.976 | 4.0 | 7.81 |
| 3-IX-82 | 0.96 | 0.246 | 0.990 | 5.8 | 9.92 |
| 14-X-82 | 0.97 | 0.246 | 0.988 | 6.5 | 10.22 |

* Los valores de C_p , δ , ΔT son promedios de los observados durante el secado, en horas del día con cielo despejado.

** Intensidad global corregida debido al ángulo de inclinación del colector solar.

CUADRO 8

PRUEBAS DE SECADO SOLAR: CALCULO DEL TIEMPO DE SECADO EN EL PERIODO DECAYENTE:

$$\frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = e^{-m(P_{vs} - P_v)^n \cdot t^q}$$

| Fecha | Tipo seca do | M | M ₀ | M _e | HRe | Te | P _v | P _{vs} | Tiempo |
|---------------|--------------------|------|----------------|----------------|------|------|-------------------|-------------------|--------|
| | | | | | % | °C | Kg/m ² | Kg/m ² | h-min |
| 4-V-82 | N | 0.13 | 0.24 | 0.07 | 20.0 | 35.4 | 110.48 | 587.00 | 8-23 |
| | I | 0.15 | 0.24 | 0.10 | 31.5 | 34.1 | 164.68 | 562.58 | 8-32 |
| 8-V-82 | N | 0.12 | 0.24 | 0.10 | 32.5 | 29.6 | 157.94 | 425.71 | 22-12 |
| | I | 0.14 | 0.24 | 0.11 | 35.5 | 30.5 | 164.68 | 438.34 | 15-05 |
| 1,2,3-IX-82 | N | 0.12 | 0.23 | 0.11 | 39.5 | 30.6 | 178.12 | 513.34 | 30-23 |
| | I | 0.13 | 0.23 | 0.12 | 44.5 | 29.8 | 178.11 | 425.71 | 30-41 |
| 4,5-IX-82 | E | 0.11 | 0.22 | 0.10 | 32.0 | 31.2 | 204.88 | 463.49 | 31-59 |
| 14,15-X-82 | N | 0.14 | 0.21 | 0.11 | 37.0 | 29.8 | 137.66 | 425.71 | 11-20 |
| | I | 0.14 | 0.21 | 0.12 | 44.5 | 28.1 | 164.68 | 387.56 | 16.23 |
| 20,22,23-X-82 | N | 0.12 | 0.23 | 0.11 | 38.2 | 27.0 | 151.20 | 362.00 | 35-06 |
| | I | 0.12 | 0.23 | 0.11 | 38.5 | 26.4 | 151.19 | 336.18 | 34-08 |

* m = 0.09687
 n = 0.13927
 q = 0.71314

CUADRO 9

PRUEBAS DE SECADO SOLAR: CALCULO DE LA EFICIENCIA DEL SECADO SOLAR INDIRECTO DE FRIJOL

$$Es = \frac{L.M.100}{E*.IG.A.**H}$$

| Variables | Días de secado | | | | |
|---|----------------|--------|----------|---------|---------|
| | 4-V-82 | 8-V-82 | 1,2,3-IX | 14,15-X | 20,22-X |
| Calor de vaporización del agua en el frijol, BTU/lb | 1178.9 | 1204.6 | 1176.8 | 1205.9 | 1186.0 |
| Cantidad de agua evaporada, lb*** | 0.458 | 0.509 | 0.587 | 0.344 | 0.562 |
| Intensidad global solar promedio cal/cm ² .min | 1.2 | 0.74 | 0.91 | 0.86 | 0.76 |
| Horas sol h | 2.5 | 4.4 | 8.2 | 4.6 | 4.2 |
| Eficiencia del secado indirecto, % | 22.83 | 23.77 | 1.67 | 1.33 | 2.62 |

* E = 8.95% 2

** A = 0.37 m

*** Carga de frijol en bandeja 3.2 kg

CUADRO 10

PRUEBAS DE SECADO SOLAR: VALORES DE EFICIENCIA DEL COLECTOR SOLAR DE
PLACA PLANA CON REFLECTORES Y SIN REFLECTORES

| Eficiencia | | | |
|-----------------|---------------------------------|-----------------|--------------------------------|
| Con Reflectores | | Sin Reflectores | |
| % | | % | |
| 4.34 | | 0.86 | |
| 8.76 | | 5.76 | |
| 10.79 | | 8.10 | |
| 12.51 | | 11.50 | |
| 10.00 | | 4.95 | |
| 13.75 | | 12.60 | |
| 11.80 | | 12.62 | |
| 15.34 | \bar{x} 10.92 s \pm 3.37 | 17.03 | \bar{x} 9.18 s \pm 5.22 |

Prueba de Student.

$$t_{.05} (7g \text{ de } l.) = 2.365$$

$$t = \frac{\bar{d}}{s\bar{d}} = \frac{1.75}{0.81} = 2.16 \text{ (N.S.)}$$

N.S. = No hay diferencias entre usar o no reflectores a nivel de t 0.05.

CUADRO 11

PRUEBAS DE SECADO SOLAR: ANGULOS DE INCLINACION DE REFLECTORES SOLARES
A DIFERENTES DIAS Y HORAS*

| Hora | Angulos | | Hora | Angulos | |
|-------|---------|------|-------|---------|------|
| | M | T | | M | T |
| 9:00 | 85° | - | 12:10 | 115° | - |
| 9:10 | 85° | - | 12:30 | 120° | 115° |
| 9:15 | 88° | - | 12:30 | 115° | 115° |
| 9:15 | 75° | - | 12:35 | 125° | 125° |
| 9:20 | 90° | - | 12:45 | 120° | 120° |
| 9:30 | 85° | - | 12:45 | 120° | 120° |
| 9:30 | 93° | - | 13:00 | 125° | 115° |
| 9:50 | 95° | - | 13:50 | - | 100° |
| 10:00 | 96° | - | 14:00 | - | 95° |
| 10:10 | 87° | - | 14:05 | - | 93° |
| 10:20 | 95° | - | 14:30 | - | 97° |
| 10:30 | 100° | - | 14:45 | - | 90° |
| 10:30 | 99° | - | 14:45 | - | 90° |
| 10:40 | 95° | - | 15:00 | - | 92° |
| 10:45 | 105° | - | 15:00 | - | 90° |
| 10:50 | 100° | - | 15:40 | - | 80° |
| 11:00 | 106° | - | 15:45 | - | 80° |
| 11:00 | 105° | - | 16:10 | - | 75° |
| 11:20 | 115° | - | 16:15 | - | 75° |
| 11:30 | 115° | - | 17:05 | - | 70° |
| 11:30 | 112° | - | | | |
| 11:35 | 110° | - | | | |
| 12:00 | 115° | - | | | |
| 12:00 | 120° | 120° | | | |

* Las mediciones fueron efectuadas en diferentes días a horas de cielo despejado.

M = Angulo por la mañana.

T = Angulo por la tarde

CUADRO 12
 ANALISIS FISICOS: COLOR DE GRANOS DE FRIJOL SECADOS
 AL SOL, INDIRECTAMENTE Y EN HORNO

| Muestras de granos de frijol | Color | |
|--------------------------------------|-------------|-----------------|
| | Negro Opaco | Negro Brillante |
| Jutiapan secado en el campo | + | - |
| J. rehidratado | + | - |
| J. secado al sol | + | - |
| J. secado indirectamente | + | - |
| J. secado en horno | + | - |
| J. secado en el campo, almacenado | + | - |
| J. rehidratado almacenado | + | - |
| J. secado indirectamente, almacenado | + | - |
| J. secado en horno, almacenado | + | - |
| Carjlic | + | - |
| C. secado al sol | + | - |
| C. secado indirectamente | + | - |
| C. secado en horno | + | - |

J = Jutiapan
 C = Carjlic

CUADRO 13

ANALISIS FISICOS: COLOR EN COTILEDON COCIDO* DE FRIJOL SECADO: AL SOL, INDIRECTAMENTE Y EN HORNO

| Muestra de Cotiledón de Frijol | Interpretación Visual del Color | | | | | | |
|--|---------------------------------|------|-----------------|---------------|-------|------|--------------|
| | Neutro | Rojo | Anaran- jado | Ama- rillo | Verde | Azul | Vio- leta |
| Jutiapan secado en el campo | - | - | - | - | 0.1 | 0.05 | - |
| J. rehidratado | 0.1 | - | - | - | - | 0.25 | - |
| J. secado al sol | 0.1 | - | - | - | - | 0.30 | - |
| J. secado indirectamente | - | - | - | - | - | 0.05 | 0.1 |
| J. Secado en horno | - | - | - | - | - | 0.15 | 0.1 |
| Jutiapan secado en el campo y almacenado | 0.1 | - | - | - | - | 0.10 | - |
| J. rehidratado almacenado | 0.1 | - | - | - | - | 0.05 | - |
| J. secado al sol almacenado | 0.1 | - | - | - | - | 0.05 | - |
| J. secado indirectamente almacenado | 0.1 | - | - | - | - | 0.05 | - |
| J. secado en horno almacenado | 0.1 | - | - | - | - | 0.02 | - |
| Carjlic | 0.1 | - | - | - | - | 0.25 | - |
| C. secado al sol | 0.05 | - | - | - | - | 0.20 | 0.5 |
| C. secado indirectamente | 0.1 | - | - | - | - | 0.25 | - |
| C. secado en horno | 0.1 | - | - | - | - | 0.30 | - |

* Cocido por 20 minutos

J = Jutiapan C = Carjlic

CUADRO 14

ANÁLISIS FÍSICOS: CULÓN EN CALDO DE COCCIÓN DE FRIJOL SECADO AL NATURAL, INDIRECTAMENTE Y EN HORNO

| Tiempo de Cocción min. | Tratamiento | Interpretación visual del color | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------------------|-----------------------|---------------------------------|---|------|------|---|-----|------------|----|------|----------|----|------|-------|---|---|------|---|---|
| | | Neutro | | | Rojo | | | Anaranjado | | | Amarillo | | | Verde | | | Azul | | |
| | | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | | | |
| 15 | Secado en el campo | 1 | 1 | 11* | 7 | 5 | - | 2 | 2 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | Rehidratado | 1 | 1 | - | 10 | - | - | - | 2 | - | - | 1 | - | - | - | - | - | - | - |
| | Secado al natural | 1 | 2 | 10 | 10 | - | 0.5 | - | - | 1 | 3.5 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | Secado indirectamente | - | 1 | 10 | 9 | - | 1 | 1 | - | 1 | - | 2 | - | - | 1 | - | - | - | - |
| | Secado en horno | - | 1 | 11 | 9 | 3 | 1 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 30 | Secado en el campo | - | 1 | 10* | 9 | 3 | 1* | 1 | - | 1 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | Rehidratado | - | - | - | 9 | 1 | - | 1 | 8 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | Secado al natural | - | 4 | 10 | 9 | 4 | 1 | 1 | 2 | 1 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | Secado indirectamente | - | 3 | 10 | 9 | 6 | - | 1 | 1 | 1 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | Secado en horno | - | - | 10 | 8 | 2 | 3 | 2 | 8 | 1 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 60 | Secado en el campo | - | - | 10 | 12 | - | - | 2 | 8 | 8 | - | 1* | 2* | - | - | - | - | - | - |
| | Rehidratado | - | - | - | 9 | 1 | - | 2 | 7 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | Secado natural | - | - | 11 | 10 | - | 0.5 | 3 | 10 | 9 | - | 1 | - | - | - | - | - | - | - |
| | Secado indirectamente | - | - | 11 | 9 | - | 0.5 | 2 | 10 | 9 | - | 1 | - | - | - | - | - | - | - |
| | Secado en horno | - | - | 10 | 6 | - | - | 5 | 10 | 5 | - | - | 5 | - | - | - | - | - | - |
| 90 | Secado en el campo | - | - | 11* | - | - | 3* | 10 | 9 | 7.5 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | Rehidratado | - | - | - | - | 1 | - | 10 | 8 | - | 1 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | Secado al natural | - | - | 12 | - | - | - | 10 | 10 | 8 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | Secado indirectamente | - | - | 12 | - | 3 | - | 10 | 10 | 9.5 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | Secado en horno | - | - | 12 | - | - | - | 10 | 10 | 13 | - | - | 0.5 | - | - | - | - | - | - |
| 120 | Secado en el campo | - | - | 11* | - | - | - | 10 | 10 | 14* | - | - | 6.5* | - | - | - | - | - | - |
| | Rehidratado | - | - | - | - | - | - | 10 | 10 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | Secado al natural | - | - | 12 | - | - | 3 | 10 | 10 | 10 | 1 | 4 | - | - | - | - | - | - | - |
| | Secado indirectamente | - | - | 18 | - | 2 | - | 10 | 10 | 13.5 | - | - | 3.5 | - | - | - | - | - | - |
| | Secado en horno | - | - | 12 | 3 | - | - | 8 | 9 | 13.1 | - | 2 | 5.0 | - | - | - | - | - | - |
| 150 | Secado en el campo | - | - | 11* | 3 | - | 7* | 10 | 10 | 21* | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | Rehidratado | - | - | - | 1 | - | - | 10 | 10 | 1 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | Secado al natural | - | - | 11.5 | - | 1 | - | 10 | 10 | 19.5 | 1 | - | 1 | - | - | - | - | - | - |
| | Secado indirectamente | - | - | 11 | 2 | 1 | - | 11 | 10 | 14.0 | - | - | 1.5 | - | - | - | - | - | - |
| | Secado en horno | - | - | 11 | 3 | - | - | 9 | 10 | 21 | - | - | 4.0 | - | - | - | - | - | - |
| 180 | Secado en el campo | - | - | 11* | 3 | - | - | 21 | 10 | 14* | - | - | 1* | - | - | - | - | - | - |
| | Rehidratado | - | - | - | 1 | 2 | - | 21 | 10 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | Secado al natural | - | - | 15.5 | - | 2 | 3 | 21 | 10 | 14.5 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | Secado indirectamente | - | - | 13 | 1 | - | - | 21 | 10 | 12.5 | - | - | 3 | - | - | - | - | - | - |
| | Secado en horno | - | - | 11 | 1 | - | - | 19 | 10 | 9 | - | - | 1 | - | - | - | - | - | - |
| 210 | Secado en el campo | - | - | 12* | - | - | 7 | 10 | 10 | 20* | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | Rehidratado | - | - | - | - | - | - | 10 | 10 | - | 1 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | Secado al natural | - | - | 21 | - | 1 | - | 11 | 10 | 19 | - | - | 5 | - | - | - | - | - | - |
| | Secado indirectamente | - | - | 11 | - | 1 | - | 10 | 10 | 17.5 | 2 | - | 6.5 | - | - | - | - | - | - |
| | Secado en horno | - | - | 20 | - | - | - | 12 | 10 | 21 | - | - | 4 | - | - | - | - | - | - |

1 = Jutiapan 2 = Jutiapan almacenado 3 = Carjilic * Carjilic recién cosechado

CUADRO 15

ANÁLISIS FÍSICOS Y BIOLÓGICOS: RESUMEN DE VALORES DE DUREZA Y NPR PARA LAS MUESTRAS DE FRIJOL

| Muestras | Dureza | | | | | NPR | | | | |
|---------------------------|-----------|---------------------|-------------------|-----------|------|-----------|------|-----------|------|--|
| | \bar{x} | - st | Kg/ mm^2 | \bar{x} | s±** | \bar{x} | s± | \bar{x} | s±** | |
| | | | | | | | | | | |
| J. secado en el campo | 0.81 | 0.16 a ¹ | 0.86 | 0.19 a | 2.30 | 0.37 a | 2.08 | 0.56 a | | |
| J. rehidratado | 0.70 | 0.16 a | 1.00 | 0.12 a | 2.32 | 0.57 a | 2.43 | 0.48 a | | |
| J. secado al natural | 0.79 | 0.17 a | 0.90 | 0.13 a' | 2.40 | 0.36 a' | 2.46 | 0.36 a' | | |
| J. secado indirectamente | 0.78 | 0.17 a' | 0.84 | 0.09 a' | 2.13 | 0.45 a' | 2.27 | 0.48 a' | | |
| J. secado en horno | 0.87 | 0.10 a' | 0.77 | 0.17 a' | 2.47 | 0.38 a' | 2.29 | 0.52 a' | | |
| C. recién cosechado | 0.74 | 0.14 a | - | - | 2.02 | 0.32 a | - | - | | |
| C. secado al natural | 0.84 | 0.11 a | - | - | 2.16 | 0.58 a | - | - | | |
| C. secado indirectamente | 0.87 | 0.15 a | - | - | 2.12 | 0.53 a | - | - | | |
| C. secado en horno | 0.83 | 0.13 a | - | - | 2.01 | 0.33 a | - | - | | |
| J. secado al natural* | 0.90 | 0.16 a | - | - | - | - | - | - | | |
| J. secado indirectamente* | 0.89 | 0.09 a | - | - | - | - | - | - | | |
| J. secado en horno* | 0.67 | 0.17 b | - | - | - | - | - | - | | |

J = Jutiapan C = Carjlic

* Jutiapan secado dentro de su vaina
 ** Jutiapan almacenado

1 = Letras diferentes en la columna \bar{x} indican diferencia significativa al 5%, letras con ' indican diferencias debido a tratamiento de secado.

CUADRO 16

ANÁLISIS FÍSICOS: TIEMPO DE COCCIÓN EN FRIJOL SECADO AL NATURAL, INDIRECTAMENTE Y EN HORNO

| Muestra de Frijol | Tiempo de Cocción (min.) | | | | | | | | | |
|-------------------------------|--------------------------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|----------|----|--|
| | 15 % | 30 % | 60 % | 90 % | 120 % | 150 % | 180 % | 210 % | | |
| Jutiapan secado en el campo | 0 | 0 | 66 | 77 | 84* | 79 | 88 | 83 | 90 | |
| J. rehidratado | 0 | 0 | 47 | 85 | 88* | 85 | 83 | 83 | 87 | |
| J. secado al sol | 0 | 0 | 53 | 66 | 87.10* | 76 | 82 | 93 | 89 | |
| J. secado indirectamente | 0 | 0 | 62 | 81 | 81.53* | 87 | 85 | 90 | 91 | |
| J. secado en horno | 0 | 0 | 62 | 81 | 87* | 80 | 86 | 88 | 92 | |
| Almacenados | | | | | | | | | | |
| J. secado en el campo | 0 | 0 | 8 | 42 | 110.45* | 85 | 79 | 89 | 82 | |
| J. rehidratado | 0 | 0 | 0 | 4 | 172.66* | 58 | 57 | 55 | 46 | |
| J. secado al sol | 0 | 0 | 32 | 52 | 103.19* | 74 | 77 | 92 | 88 | |
| J. secado indirectamente | 0 | 0 | 34 | 56 | 103.19* | 62 | 85 | 94 | 90 | |
| J. secado en horno | 0 | 0 | 44 | 86 | 85.00* | 87 | 86 | 93 | 90 | |
| Carjlic recién cosechado | | | | | | | | | | |
| Carjlic secado al sol | 0 | 0 | 36 | 78 | 91.3* | 86 | 87 | 86 | 89 | |
| Carjlic secado indirectamente | 0 | 0 | 30 | 42 | 102.3* | 87 | 87 | 84 | 89 | |
| Carjlic secado en horno | 0 | 0 | 35 | 65 | 93.44* | 84 | 88 | 92 | 93 | |
| Carjlic secado en horno | 0 | 0 | 30 | 86 | 87.57* | 90 | 92 | 92 | 92 | |

% = Porcentaje de granos rotos J = Jutiapan C = Carjlic
 * Tiempo de cocción (min.) calculado mediante regresión lineal, con "r" altamente significativa (P < 0.01)

CUADRO 17

ANÁLISIS FÍSICOS: COEFICIENTES DE HIDRATACION (C.H.), PORCENTAJE DE ABSORCIÓN DE AGUA (P.A.A.) Y PORCENTAJE DE CASCARA DURA* EN FRIJOL SECADO AL NATURAL, INDIRECTAMENTE Y EN HORNO**

| Muestra | Análisis físico | Tiempo (horas) | | | | | | |
|--------------------------------|-----------------|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 24 |
| Jutiapan secado en el campo | C.H. | 172.26 | 198.98 | 213.76 | 213.19 | 211.48 | 209.21 | 221.72 |
| | *** | 143.63 | 184.18 | 205.03 | 215.45 | 224.72 | 227.04 | 231.67 |
| | PAA | 80.36 | 110.84 | 106.90 | 130.06 | 140.00 | 128.57 | 146.84 |
| | *** | 40.91 | 78.65 | 98.88 | 104.40 | 115.56 | 117.78 | 123.46 |
| Jutiapan rehidratado | C.H. | 174.85 | 205.23 | 226.93 | 226.31 | 232.51 | 229.41 | 246.16 |
| | *** | 192.68 | 217.44 | 229.52 | 231.34 | 228.92 | 213.94 | 225.30 |
| | PAA | 72.00 | 99.38 | 114.04 | 119.88 | 125.90 | 122.89 | 139.16 |
| | *** | 87.65 | 115.67 | 123.53 | 132.12 | 131.10 | 137.04 | 134.59 |
| Jutiapan secado al sol | C.H. | 139.14 | 159.98 | 183.08 | 205.05 | 215.19 | 209.55 | 230.96 |
| | *** | 141.73 | 170.08 | 207.68 | 223.88 | 223.30 | 219.83 | 230.82 |
| | PAA | 34.97 | 58.66 | 81.56 | 106.82 | 113.41 | 109.00 | 132.95 |
| | *** | 33.15 | 64.24 | 97.25 | 109.19 | 116.85 | 113.48 | 140.36 |
| Jutiapan secado indirectamente | C.H. | 142.86 | 174.86 | 195.43 | 208.57 | 213.14 | 220.00 | 230.86 |
| | *** | 133.11 | 183.24 | 202.26 | 218.97 | 224.73 | 229.92 | 230.50 |
| | PAA | 39.66 | 69.06 | 94.32 | 101.66 | 109.46 | 140.62 | 135.00 |
| | *** | 29.77 | 81.71 | 91.80 | 109.44 | 117.88 | 139.70 | 133.92 |
| Jutiapan secado en horno | C.H. | 133.44 | 173.58 | 196.76 | 208.07 | 214.86 | 223.34 | 240.87 |
| | *** | 120.03 | 154.32 | 176.61 | 197.19 | 211.48 | 227.48 | 237.77 |
| | PAA | 27.57 | 73.45 | 91.21 | 97.85 | 107.65 | 112.36 | 142.04 |
| | *** | 19.32 | 42.10 | 61.78 | 94.92 | 110.23 | 127.43 | 135.03 |
| Carjilic recién cosechado | C.H. | 201.82 | 212.90 | 213.51 | 214.13 | 215.36 | 223.36 | 243.66 |
| | PAA | 69.95 | 90.11 | 90.30 | 91.21 | 91.26 | 101.67 | 118.78 |
| Carjilic secado al natural | C.H. | 120.16 | 130.17 | 134.07 | 155.76 | 156.32 | 179.68 | 232.53 |
| | PAA | 17.39 | 25.81 | 29.57 | 45.83 | 51.89 | 70.00 | 121.16 |
| Carjilic secado indirectamente | C.H. | 122.14 | 137.27 | 145.11 | 170.33 | 170.33 | 192.74 | 234.20 |
| | PAA | 15.96 | 32.43 | 42.31 | 67.96 | 67.03 | 82.01 | 128.42 |
| Carjilic secado en horno | C.H. | 108.00 | 119.00 | 133.00 | 157.50 | 162.50 | 164.00 | 182.50 |
| | PAA | 16.13 | 29.35 | 37.82 | 69.35 | 70.16 | 78.26 | 100.55 |

* No se observó ningún porcentaje con y sin almacenamiento

** Valores expresados en base seca

*** Valores para frijol almacenado

CUADRO 18

ANALISIS QUIMICOS: HUMEDAD, TANINOS, ACTIVIDAD DE POLIFENOLOXIDASA (A.P.F.), INDICE DE SOLUBILIDAD NITROGENO (ISN) EN FRIJOL SECADO AL NATURAL, INDIRECTAMENTE MEDIANTE EL USO DEL COLECTOR SOLAR Y EN

HORNO

| Muestra de Frijol | Análisis Químicos | | | | | | | | | |
|-----------------------------|-------------------|-----------------|----------------|------|---------------|-------------------|-------|-------|-------|-------|
| | Humedad % | Taninos | | | A.P.F.O. U/g. | ISN % del N total | * | | | |
| | | Catequina % B.S | Hagerman % B.S | % | | | | | | |
| Jutiapan secado en el campo | 12.05 | 13.67 | 0.67 | 0.53 | 0.28 | 0.12 | 23.17 | 22.74 | 59.54 | 54.44 |
| J. rehidratado** | 19.36 | 17.22 | 0.59 | 0.48 | 0.14 | 0.08 | 24.80 | 24.16 | 57.62 | 48.73 |
| J. secado al natural | 11.24 | 13.57 | 0.43 | 0.28 | 0.14 | 0.09 | 23.05 | 22.53 | 60.42 | 40.37 |
| J. secado indirectamente | 12.50 | 13.23 | 0.52 | 0.28 | 0.16 | 0.09 | 23.05 | 22.86 | 61.63 | 53.31 |
| J. secado en horno | 11.57 | 12.52 | 0.36 | 0.30 | 0.12 | 0.10 | 22.62 | 20.00 | 59.46 | 47.43 |
| C. recién cosechado | 18.74 | - | 1.27 | - | 0.25 | - | 30.76 | - | 62.21 | - |
| C. secado al natural | 9.66 | - | 0.57 | - | 0.16 | - | 22.25 | - | 59.38 | - |
| C. secado indirectamente | 10.12 | - | 0.56 | - | 0.16 | - | 25.77 | - | 58.62 | - |
| C. secado en horno | 10.76 | - | 0.58 | - | 0.16 | - | 25.46 | - | 57.74 | - |

* Almacenado a 30°C, humedad relativa 60% y un tiempo de 3 meses.

** Rehidratado, sometido el frijol seco a un remojo en agua en la relación agua-frijol 3:1 y un tiempo de 40 minutos.

J = Jutiapan C = Carjlic

CUADRO 19

ANALISIS MICROBIOLÓGICOS: PORCENTAJE DE GRANOS ANALIZADOS MICROBIOLÓGICAMENTE EN FRIJOL SECADO AL NATURAL, INDIRECTAMENTE MEDIANTE EL COLECTOR SOLAR Y EN HORNO*

| Muestras de Frijol | Recuento total ** | Levaduras ** | Hongos ** |
|--------------------------|-------------------|--------------|-----------|
| J. secado en el campo | 100 60 | 0 10 | 110 40 |
| J. rehidratado | 280 120 | 10 0 | 120 50 |
| J. secado al natural | 200 60 | 40 0 | 150 20 |
| J. secado indirectamente | 80 60 | 20 0 | 50 40 |
| J. secado en horno | 80 60 | 20 0 | 100 60 |
| Carjlic recién cosechado | 70 - | 0 - | 120 - |
| C. secado al natural | 80 - | 0 - | 120 - |
| C. secado indirectamente | 70 - | 0 - | 80 - |
| C. secado en horno | 70 - | 0 - | 60 - |

* Número de colonias por 100 gramos de alícuota de frijol tomada.

** Número de colonias por 100 gramos de alícuota de frijol almacenado.

J = Jutiapan

C = Carjlic

CUADRO 20

VALORES DE EFICIENCIA DEL COLECTOR SOLAR, TOMADAS A DIFERENTES LONGITUDES

| Estrato pajo | Variables Angulo | Vol** | E1 | | | E2 | | | E3 | | | E4 | | |
|-----------------|---------------------|-------|-------------|----------------|------|-----------|----------------|------|-----------|----------------|------|-----------|----------------|------|
| | | | \bar{x} * | s _t | C.V. | \bar{x} | s _t | C.V. | \bar{x} | s _t | C.V. | \bar{x} | s _t | C.V. |
| S | 0.00° | 40 | 33.23 | 4.51 | 13.6 | 32.79 | 1.18 | 3.6 | 18.30 | 0.74 | 4.0 | 13.13 | 0.63 | 4.8 |
| | | 80 | 46.52 | 11.41 | 11.8 | 150.95 | 4.63 | 3.0 | 84.88 | 9.32 | 2.7 | 61.23 | 1.31 | 2.1 |
| | | 120 | 95.83 | 20.82 | 21.7 | 155.34 | 15.06 | 9.6 | 85.51 | 9.09 | 10.6 | 59.75 | 6.33 | 10.6 |
| I | 14.61° | 40 | 53.69 | 8.08 | 15.1 | 27.19 | 1.14 | 4.2 | 15.20 | 0.52 | 3.4 | 10.90 | 0.48 | 4.4 |
| | | 80 | 150.40 | 26.11 | 17.4 | 134.66 | 6.92 | 5.1 | 74.97 | 4.74 | 6.3 | 54.52 | 2.78 | 5.1 |
| | | 120 | 139.47 | 20.04 | 14.4 | 126.82 | 26.13 | 20.6 | 74.74 | 2.31 | 3.1 | 53.19 | 2.12 | 4.0 |
| N | 24.61° | 40 | 22.51 | 9.19 | 40.8 | 29.46 | 1.44 | 4.8 | 14.73 | 0.26 | 1.8 | 10.50 | 0.21 | 2.0 |
| | | 80 | 97.26 | 8.84 | 9.1 | 151.20 | 11.89 | 7.8 | 80.78 | 5.31 | 6.6 | 56.81 | 5.56 | 9.8 |
| | | 120 | 91.85 | 11.60 | 12.6 | 162.28 | 6.30 | 3.8 | 87.80 | 2.67 | 3.0 | 60.96 | 2.89 | 4.7 |
| | 29.61° | 40 | 34.52 | 16.71 | 48.4 | 29.82 | 4.36 | 14.6 | 15.12 | 1.63 | 10.8 | 10.50 | 1.06 | 10.1 |
| | | 80 | 66.12 | 27.14 | 41.1 | 142.44 | 10.61 | 7.4 | 79.67 | 5.31 | 6.7 | 57.22 | 3.21 | 5.6 |
| | | 120 | 54.92 | 24.91 | 45.4 | 133.76 | 6.01 | 4.4 | 75.25 | 7.00 | 9.3 | 54.41 | 4.23 | 7.8 |
| C | 0.00° | 40 | 32.15 | 3.65 | 11.4 | 26.03 | 2.46 | 9.4 | 16.24 | 1.29 | 8.0 | 11.83 | 1.14 | 9.6 |
| | | 80 | 130.58 | 12.83 | 9.8 | 115.49 | 9.48 | 8.2 | 72.59 | 4.48 | 6.2 | 53.40 | 3.44 | 6.4 |
| | | 120 | 99.93 | 25.24 | 25.3 | 79.58 | 43.71 | 54.9 | 65.36 | 9.88 | 15.1 | 49.83 | 4.46 | 8.9 |
| O | 14.61° | 40 | 32.68 | 4.83 | 14.8 | 20.21 | 2.82 | 13.9 | 12.26 | 1.87 | 15.2 | 9.48 | 1.31 | 13.8 |
| | | 80 | 102.84 | 10.10 | 9.8 | 90.28 | 4.11 | 4.5 | 56.07 | 4.12 | 7.3 | 41.90 | 3.60 | 8.6 |
| | | 120 | 118.60 | 18.06 | 15.2 | 85.88 | 10.76 | 12.5 | 53.33 | 6.96 | 13.1 | 40.63 | 3.22 | 7.9 |
| N | 24.61° | 40 | 39.67 | 4.82 | 12.2 | 26.60 | 2.88 | 10.8 | 16.28 | 1.61 | 9.9 | 11.27 | 1.23 | 11.0 |
| | | 80 | 120.42 | 14.09 | 11.7 | 106.20 | 8.28 | 7.7 | 69.41 | 5.14 | 7.4 | 50.55 | 1.23 | 2.4 |
| | | 120 | 139.42 | 17.20 | 12.3 | 101.78 | 8.04 | 7.8 | 65.02 | 6.41 | 9.9 | 46.50 | 2.80 | 6.0 |
| | 29.61° | 40 | 30.34 | 7.63 | 25.1 | 15.12 | 5.85 | 38.6 | 10.78 | 2.03 | 18.9 | 7.68 | 0.52 | 6.8 |
| | | 80 | 103.34 | 30.85 | 29.9 | 81.08 | 19.78 | 24.3 | 53.11 | 7.22 | 13.6 | 43.23 | 4.23 | 9.8 |
| | | 120 | 105.34 | 13.21 | 12.5 | 79.27 | 9.45 | 11.9 | 49.96 | 2.60 | 5.2 | 43.30 | 1.31 | 3.0 |
| P | 0.00° | 40 | 34.88 | 7.35 | 21.1 | 20.73 | 3.00 | 14.4 | 14.39 | 4.31 | 30.0 | 10.79 | 2.78 | 24.9 |
| | | 80 | 156.30 | 19.39 | 12.4 | 94.57 | 22.90 | 24.2 | 65.18 | 14.37 | 22.0 | 46.35 | 8.04 | 17.4 |
| | | 120 | 162.26 | 21.89 | 13.5 | 94.32 | 17.88 | 18.9 | 64.46 | 13.41 | 20.8 | 44.0 | 5.53 | 12.6 |
| I | 14.61° | 40 | 14.40 | 7.63 | 53.0 | 15.56 | 7.66 | 49.1 | 10.42 | 4.74 | 45.4 | 7.84 | 3.90 | 49.8 |
| | | 80 | 114.43 | 71.47 | 62.5 | 76.86 | 23.29 | 30.3 | 69.35 | 15.88 | 32.2 | 34.48 | 11.48 | 33.3 |
| | | 120 | 54.28 | 12.48 | 23.0 | 65.52 | 18.76 | 28.6 | 42.42 | 12.70 | 30.0 | 31.82 | 7.54 | 23.7 |
| N | 24.61° | 40 | 33.07 | 23.45 | 70.9 | 28.94 | 9.32 | 32.2 | 17.99 | 4.51 | 25.1 | 12.03 | 2.34 | 19.5 |
| | | 80 | 56.37 | 46.02 | 81.6 | 110.82 | 35.62 | 22.1 | 71.88 | 18.02 | 25.1 | 49.60 | 10.37 | 20.9 |
| | | 120 | 77.36 | 56.54 | 73.1 | 107.00 | 36.38 | 34.0 | 69.20 | 18.71 | 27.0 | 47.89 | 9.42 | 19.7 |
| | 29.61° | 40 | 28.31 | 12.83 | 45.3 | 14.02 | 9.27 | 66.1 | 10.63 | 3.23 | 30.4 | 8.23 | 2.73 | 33.2 |
| | | 80 | 51.97 | 17.80 | 34.3 | 75.27 | 10.52 | 13.9 | 45.10 | 7.42 | 16.5 | 35.60 | 5.20 | 14.6 |
| | | 120 | 69.63 | 22.85 | 32.8 | 68.38 | 26.00 | 38.0 | 47.79 | 5.17 | 10.8 | 35.04 | 3.57 | 10.2 |

* Promedio de 4 observaciones

** Voltaje del redstato equivalente a flujos de aire de 0.40, 2.03 y 2.22 m³/min

E1 = Tomada a 0.36 m.

E2 = Tomada a 1.26 m.

E3 = Tomada a 2.16 m.

E4 = Tomada a 3.06 m.

CUADRO 21

EVALUACION DE IGUALDAD DE VARIANZAS A DISTINTAS EFICIENCIAS, USANDO LA TENDENCIA DE BOX (BARTLETT). DATOS ORIGINALES EXCLUYENDO ESTROPAJO PIN Y FLUJO DE 0.40 m³/min

| Variable Dependiente | Box 1.67 | Efectos e Interacciones | | | | | | |
|----------------------|----------|-------------------------|------|-----|-----|-----|-----|-------|
| | | Estrop. | Ang. | VOL | ExA | ExF | AxF | ExAxF |
| EF 1 | 0.76 NS | ** | | NS | *** | NS | NS | NS |
| EF 2 | 2.60(*) | - | - | - | - | - | - | - |
| EF 3 | 1.01 NS | *** | *** | NS | NS | NS | NS | NS |
| EF 4 | 1.08 NS | *** | *** | NS | NS | NS | NS | NS |

* P / 0.05
 ** P / 0.01
 *** P / 0.001

- No aplica

VOL = Voltaje de reóstato equivalente a un flujo de 0.40m³/min

CUADRO 22

EFICIENCIA OBTENIDA MEDIANTE EL EFECTO DE CON Y SIN ESTROPAJO, ANGULOS DE INCLINACION 0°- 24.61° Y FLUJOS DE AIRE DE 0.40 Y 2.22 m³/min.

| Estropajo | Angulo | Vol | $\frac{E4}{\bar{x}^*}$ | \bar{s} | C.V. |
|-----------|--------|--------|------------------------|-----------|-------|
| | | 80** | 110.56 | 15.25 | 37.60 |
| C | 0.00° | 120*** | 44.75 | 15.18 | 26.27 |
| O | | 80 | 30.32 | 6.15 | 20.30 |
| N | 24.61° | 120 | 31.17 | 7.86 | 25.22 |
| | | 80 | 57.13 | 5.01 | 8.77 |
| S | 0.00° | 120 | 62.64 | 6.35 | 10.14 |
| I | | 80 | 46.62 | 10.77 | 23.11 |
| N | 24.61° | 120 | 50.42 | 8.61 | 17.09 |

C.V. = Coeficiente de variación

* Promedio de 8 observaciones.

** Voltaje del reóstato equivalente a un flujo de 2.03 m³/min

*** Voltaje del reóstato equivalente a un flujo de 2.22 m³/min

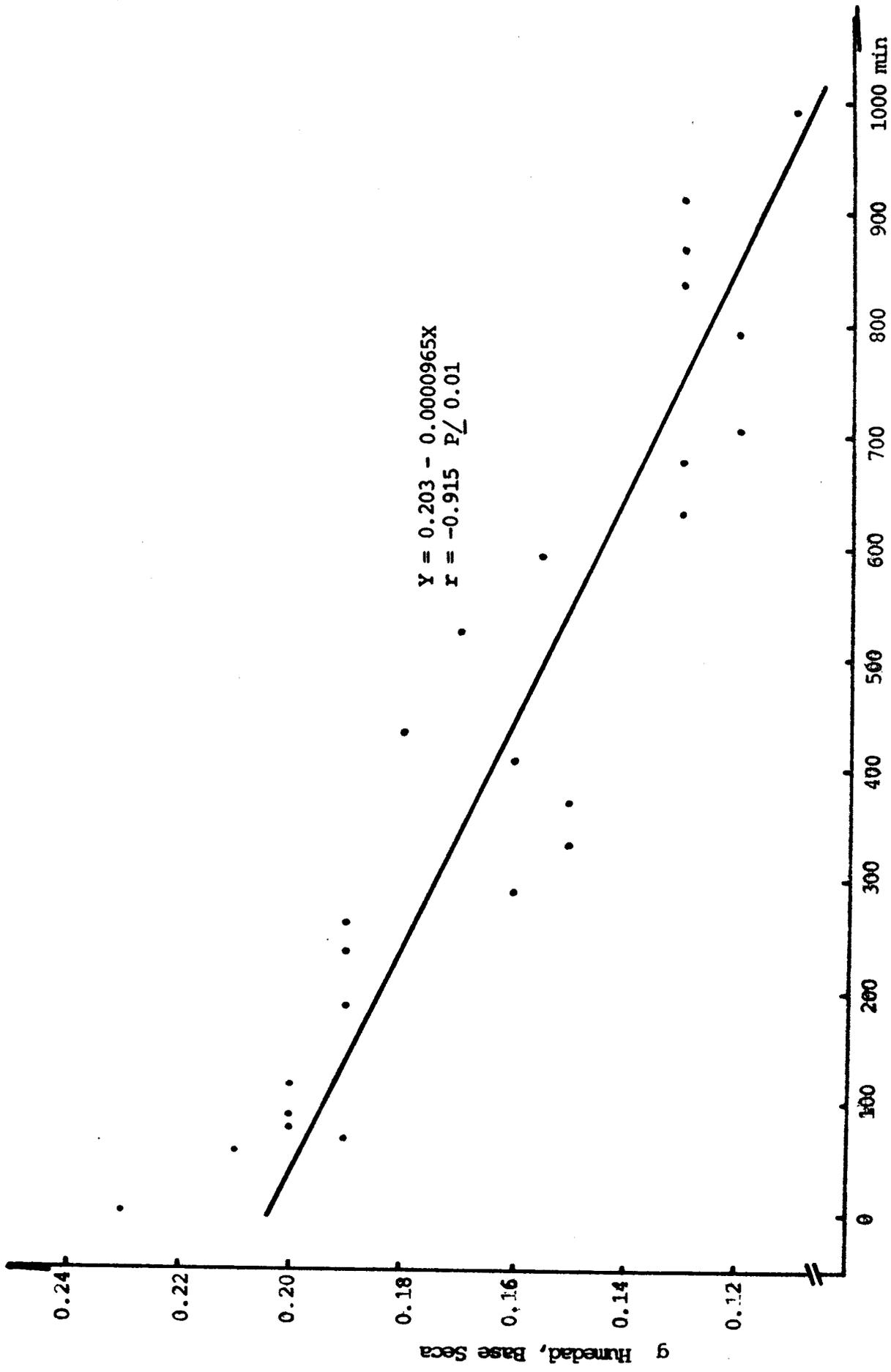


Fig. 1 CURVA DE SECADO: HUMEDAD EN BASE SECA EN FUNCION DEL TIEMPO DE SECADO
 Secado de frijol Carylic al Natural días 1,2 y3-IX-82

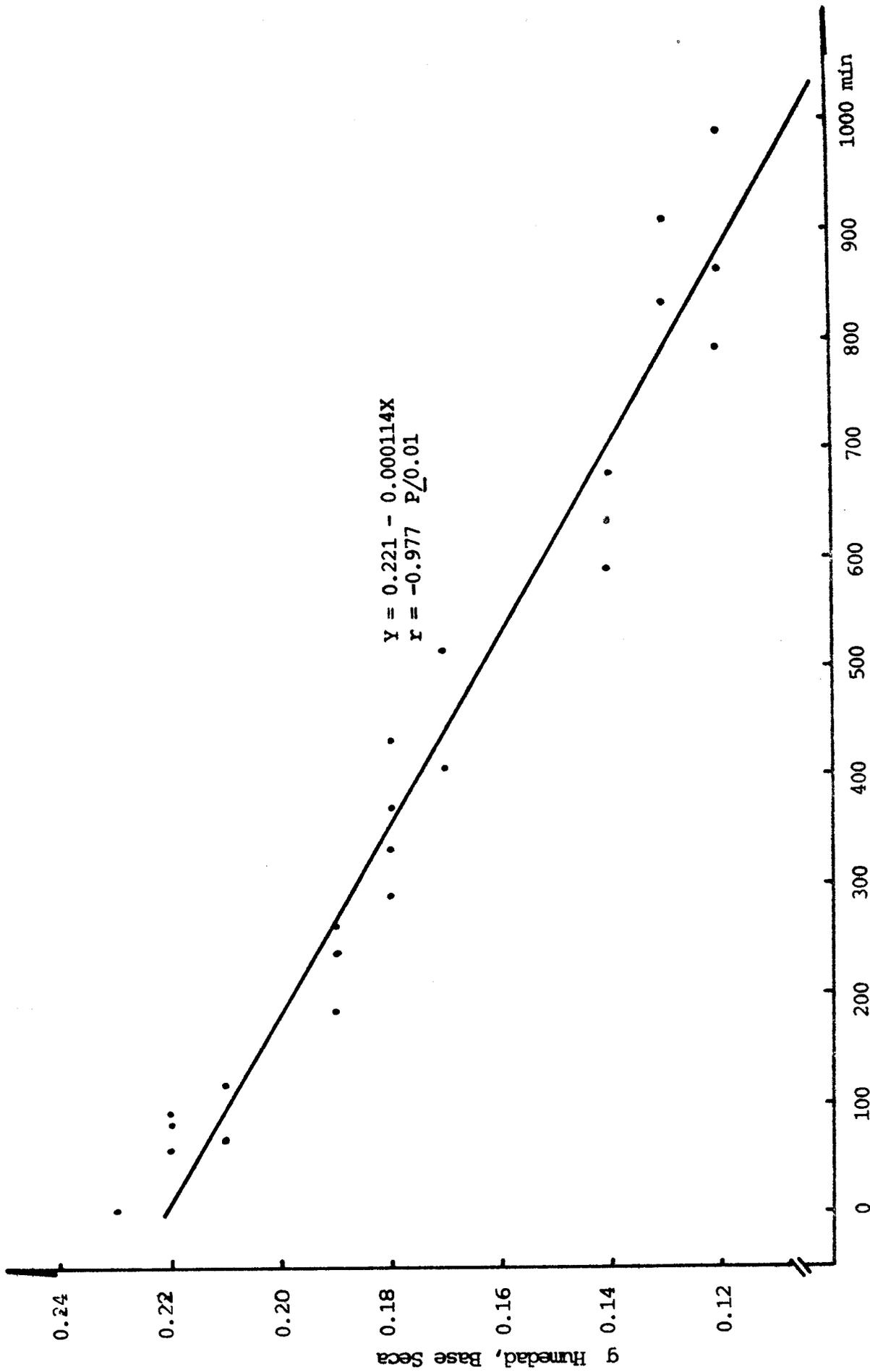


Fig. 2 CURVA DE SECADO: HUMEDAD EN BASE SECA EN FUNCION DEL TIEMPO DE SECADO
 Secado de frijol Carjlic Indirectamente con el uso
 del Colector Solar de Placa Plana días 1,2y3-IX-82

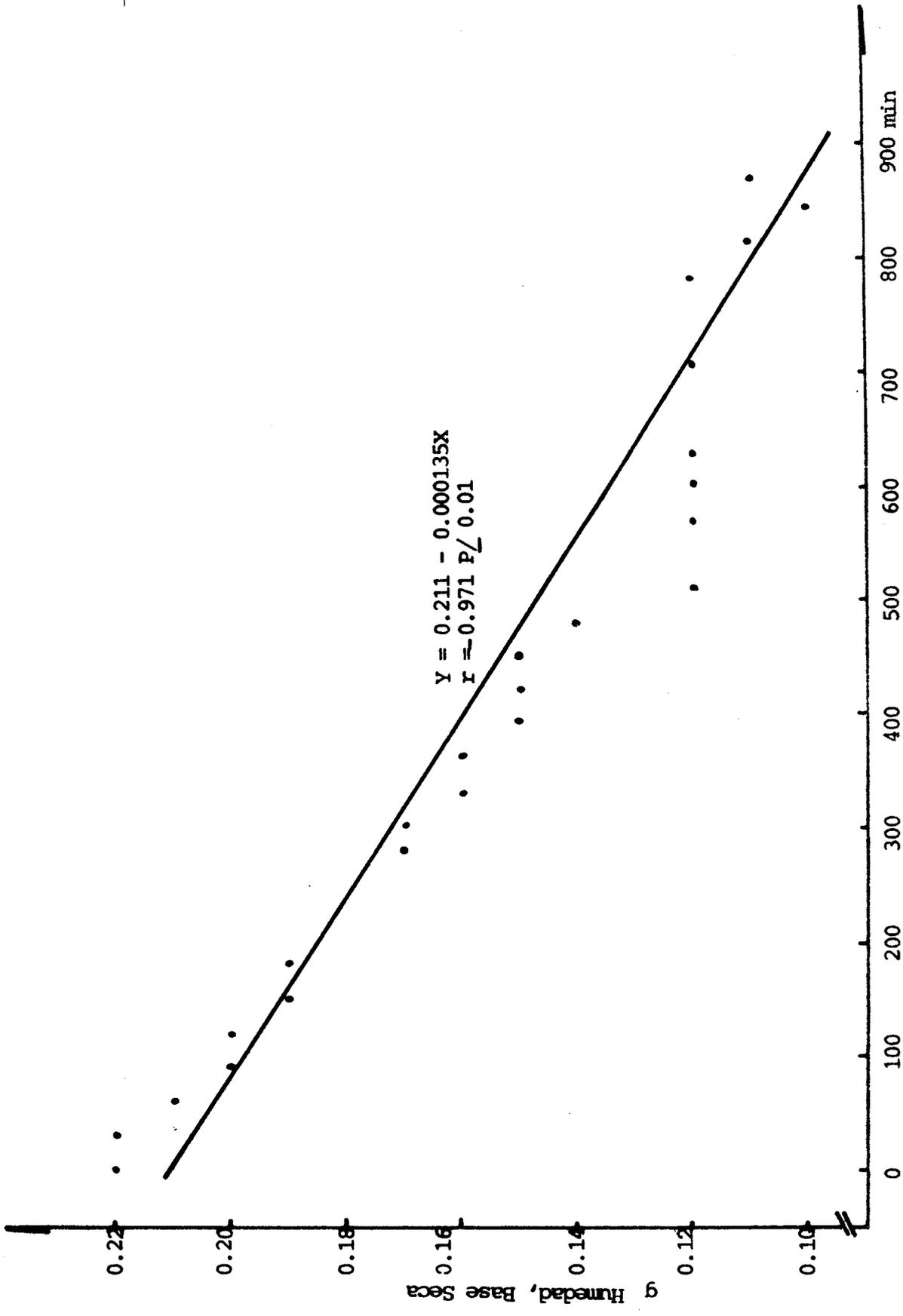


Fig. 3 CURVA DE SECADO: HUMEDAD EN BASE SECA EN FUNCION DEL TIEMPO DE SECADO
 Secado de frijol Carjilic en horno días 4y5-IX-82

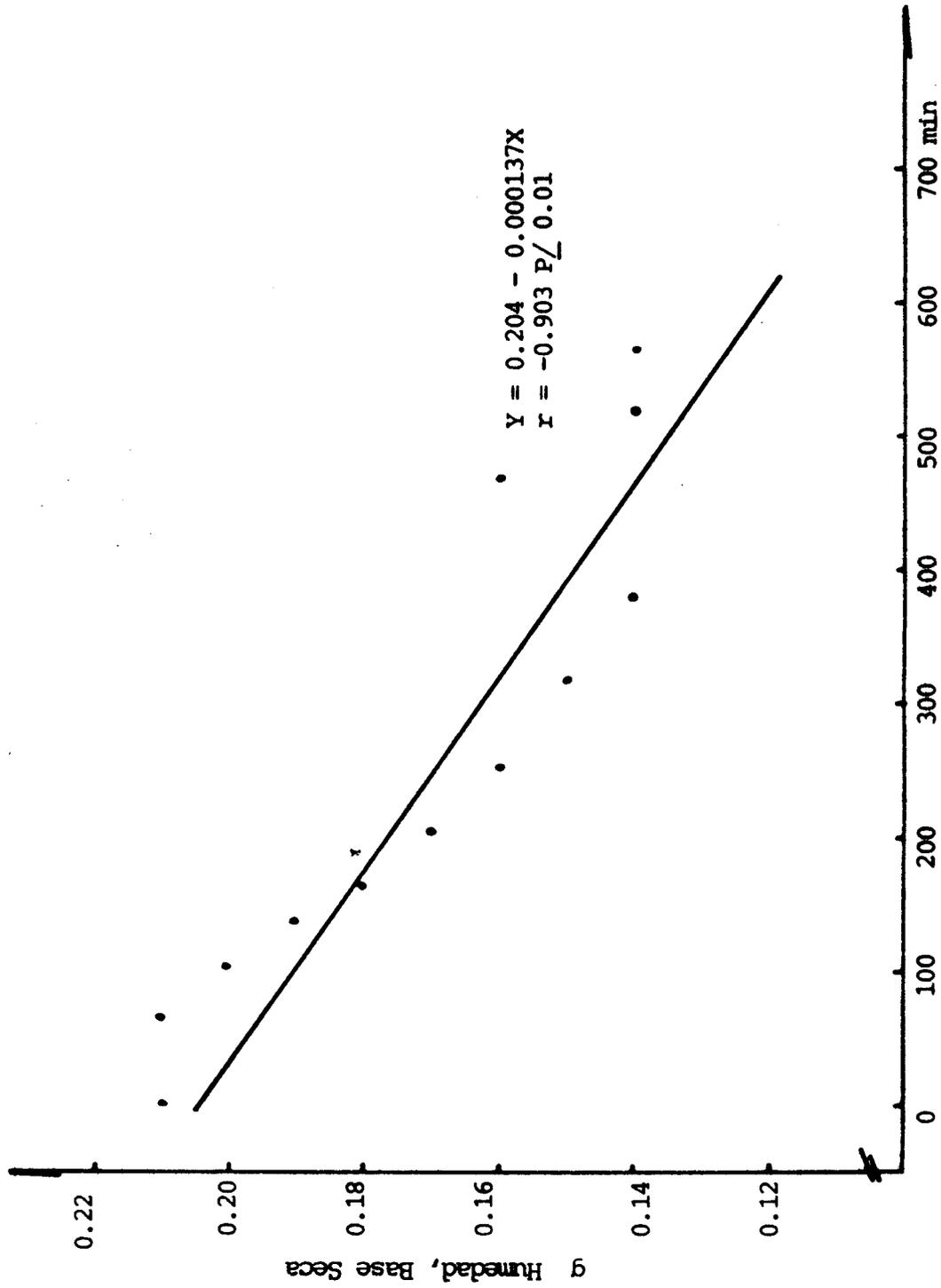


FIG. 4 CURVA DE SECADO: HUMEDAD EN BASE SECA EN FUNCION DEL TIEMPO DE SECADO
 Secado de frijol Carjilic al Natural días 14,15-X-82

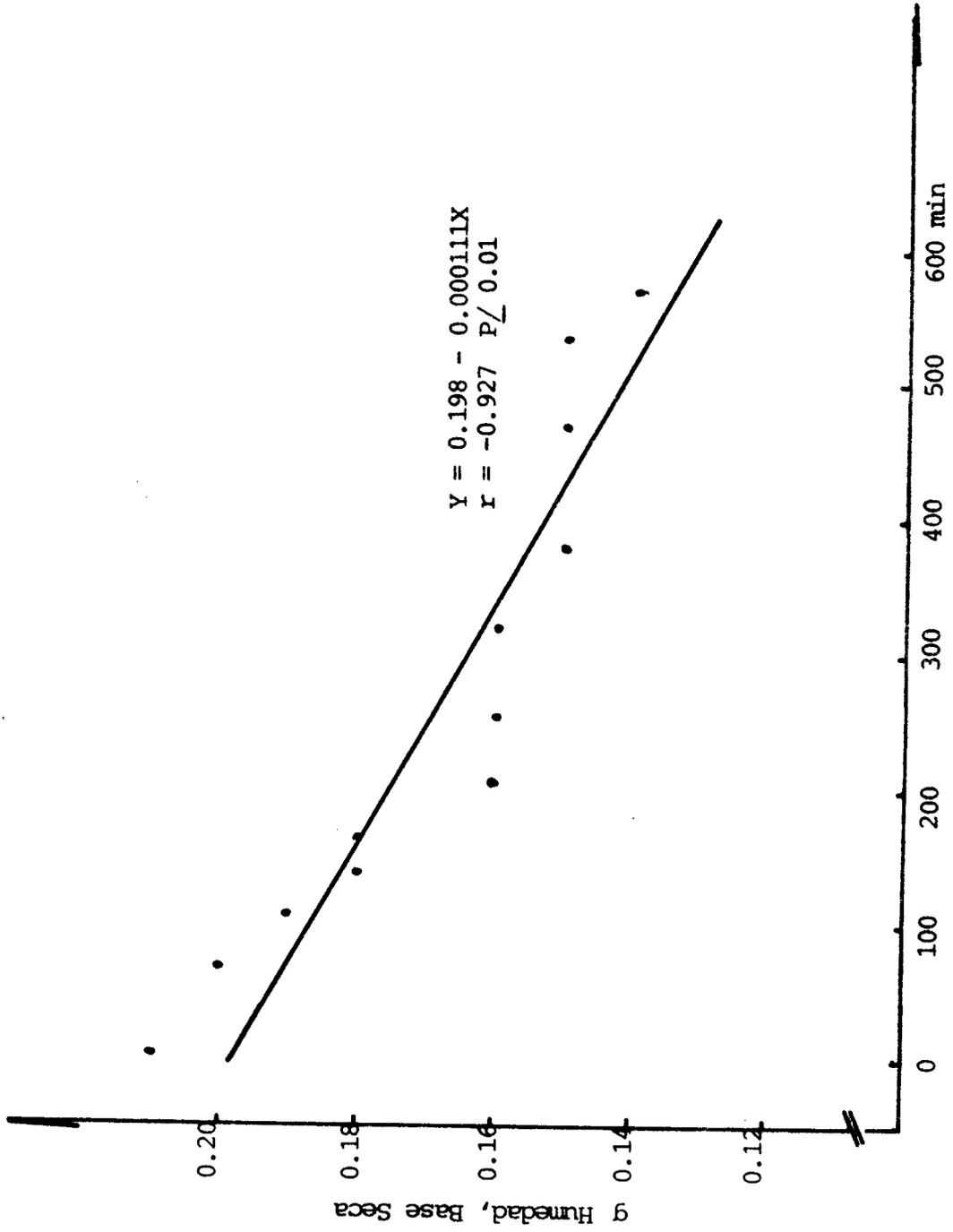


Fig. 5 CURVA DE SECADO: HUMEDAD EN BASE SECA EN FUNCION DEL TIEMPO DE SECADO
 Secado de frijol Carjlic Indirectamente con el uso
 del Colector Solar de Placa Plana días 14y15-X-82

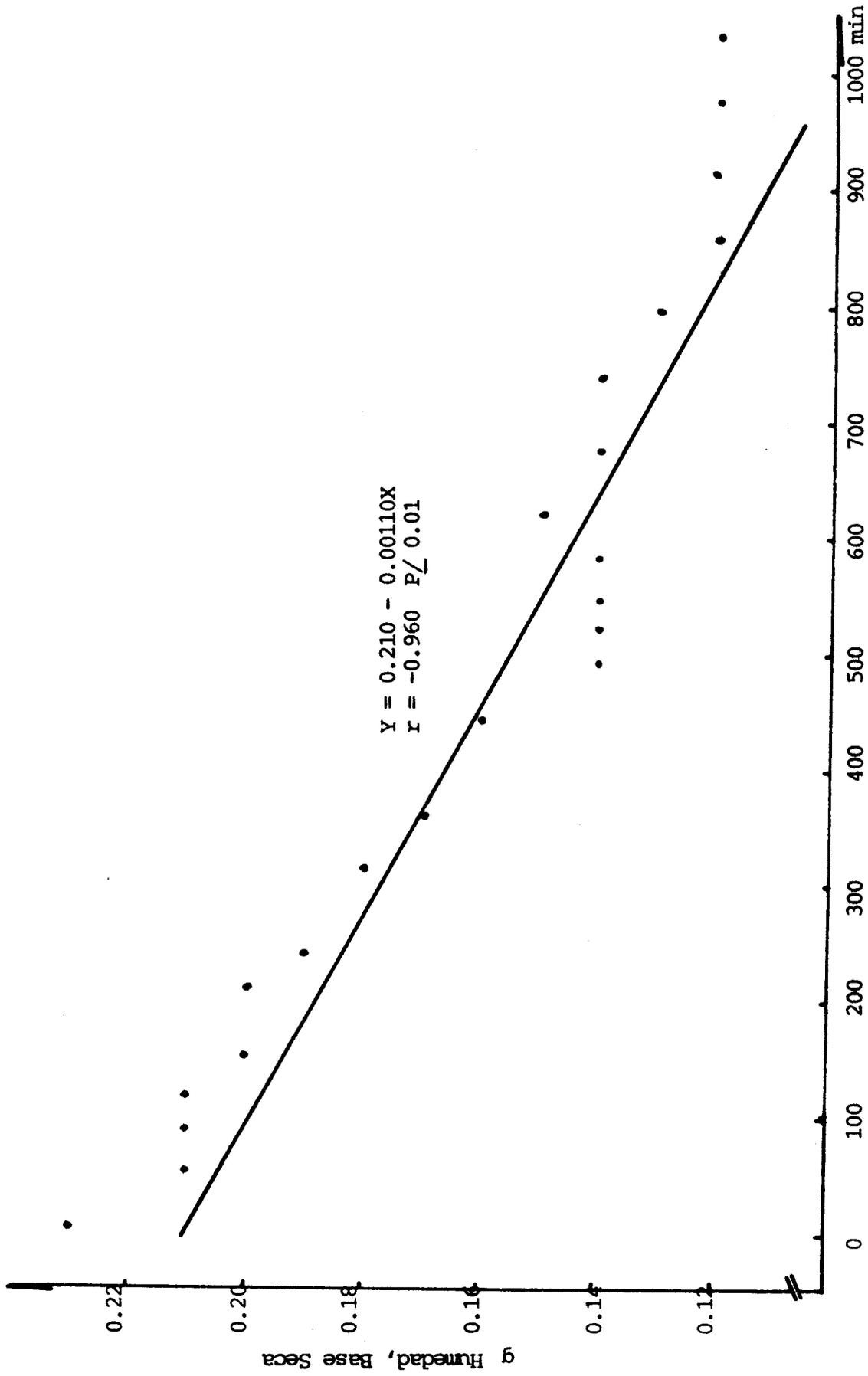


Fig. 6 CURVA DE SECADO: HUMEDAD EN BASE SECA EN FUNCION DEL TIEMPO DE SECADO
Secado de frijol Carjilic al Natural días 20,22y23-X-82

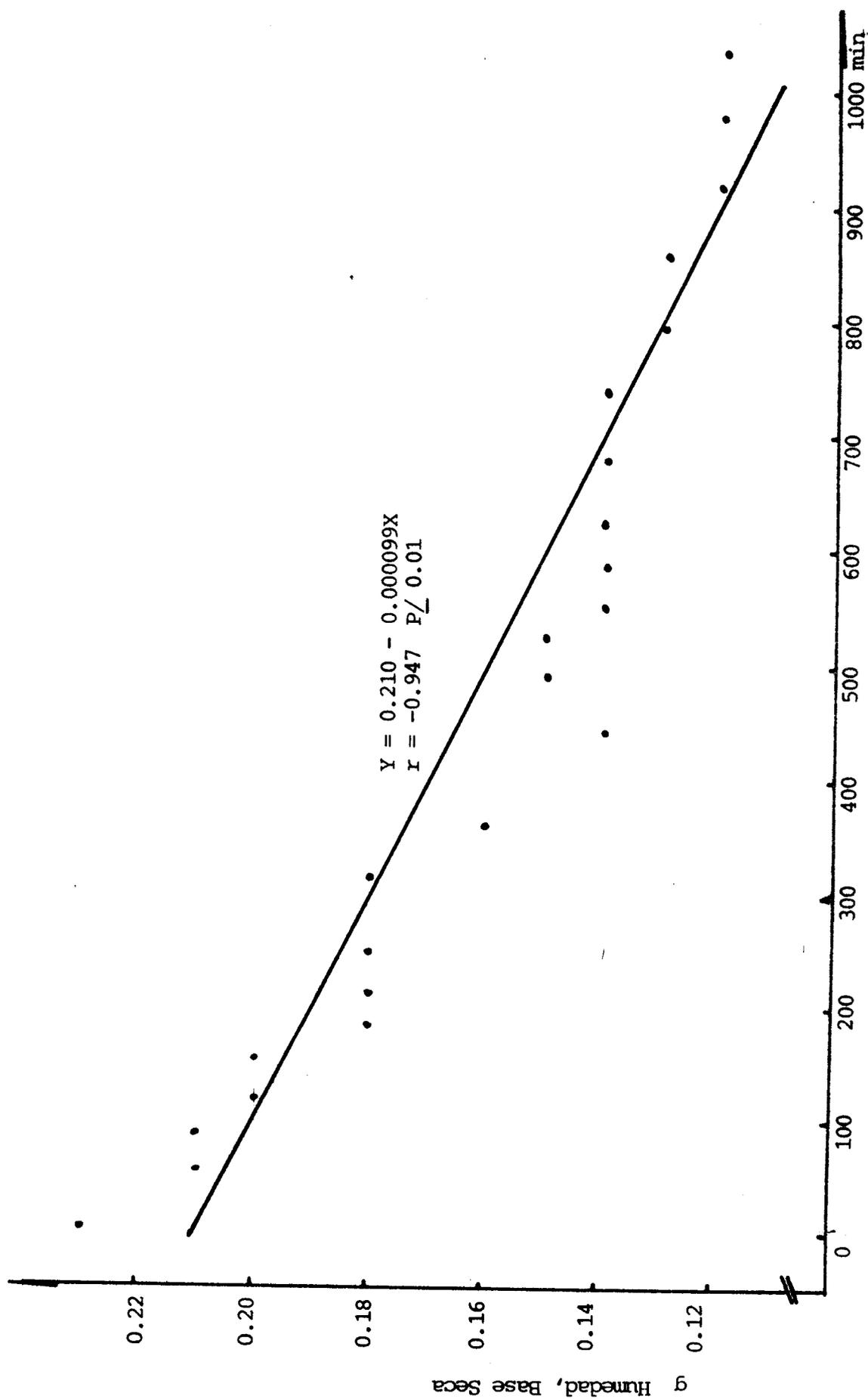


Fig. 7 CURVA DE SECADO: HUMEDAD EN BASE SECA EN FUNCION DEL TIEMPO DE SECADO
 Secado de frijol Carjilic Indirectamente con el uso
 del Colector Solar de Placa Plana días 20,22y23-X-82

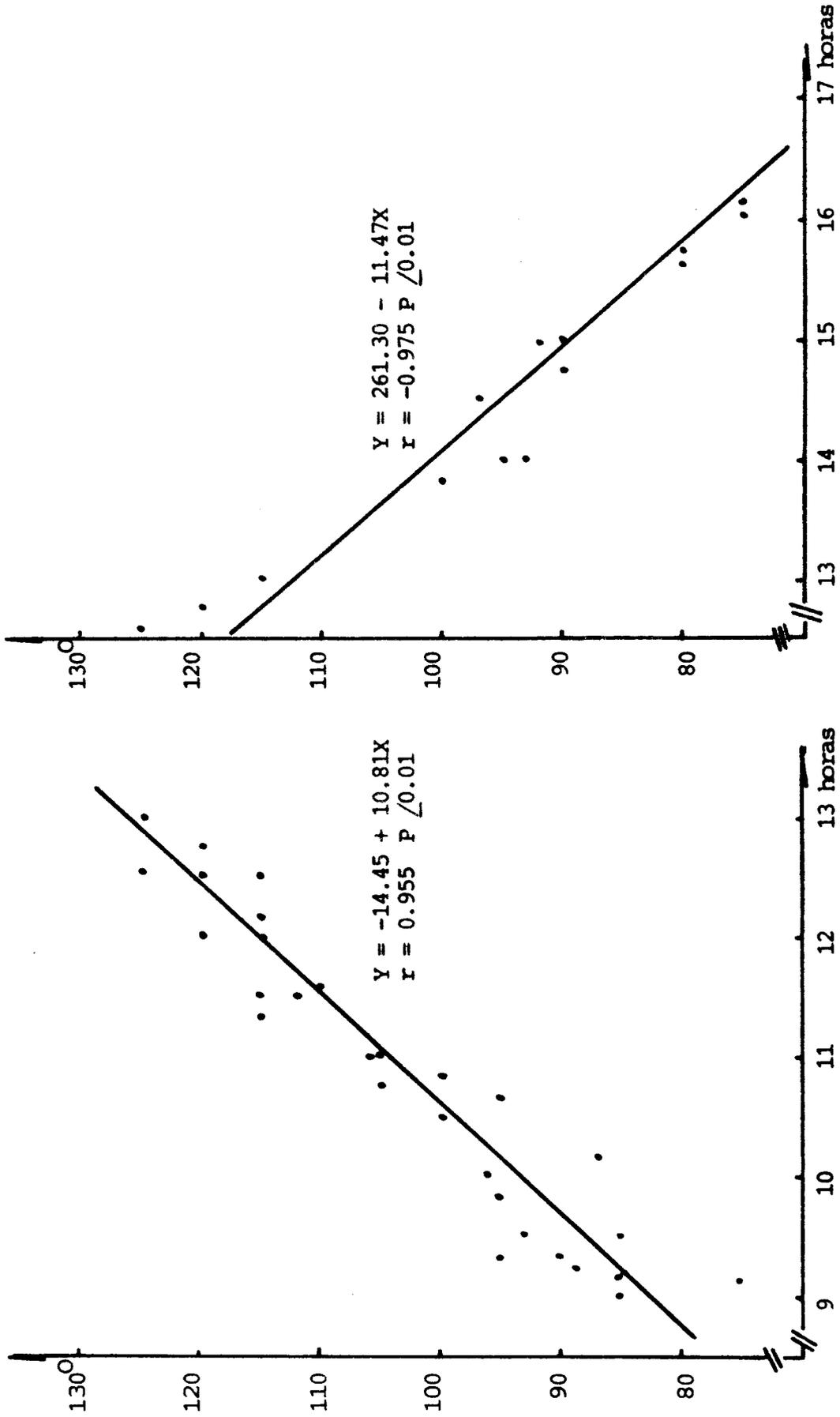
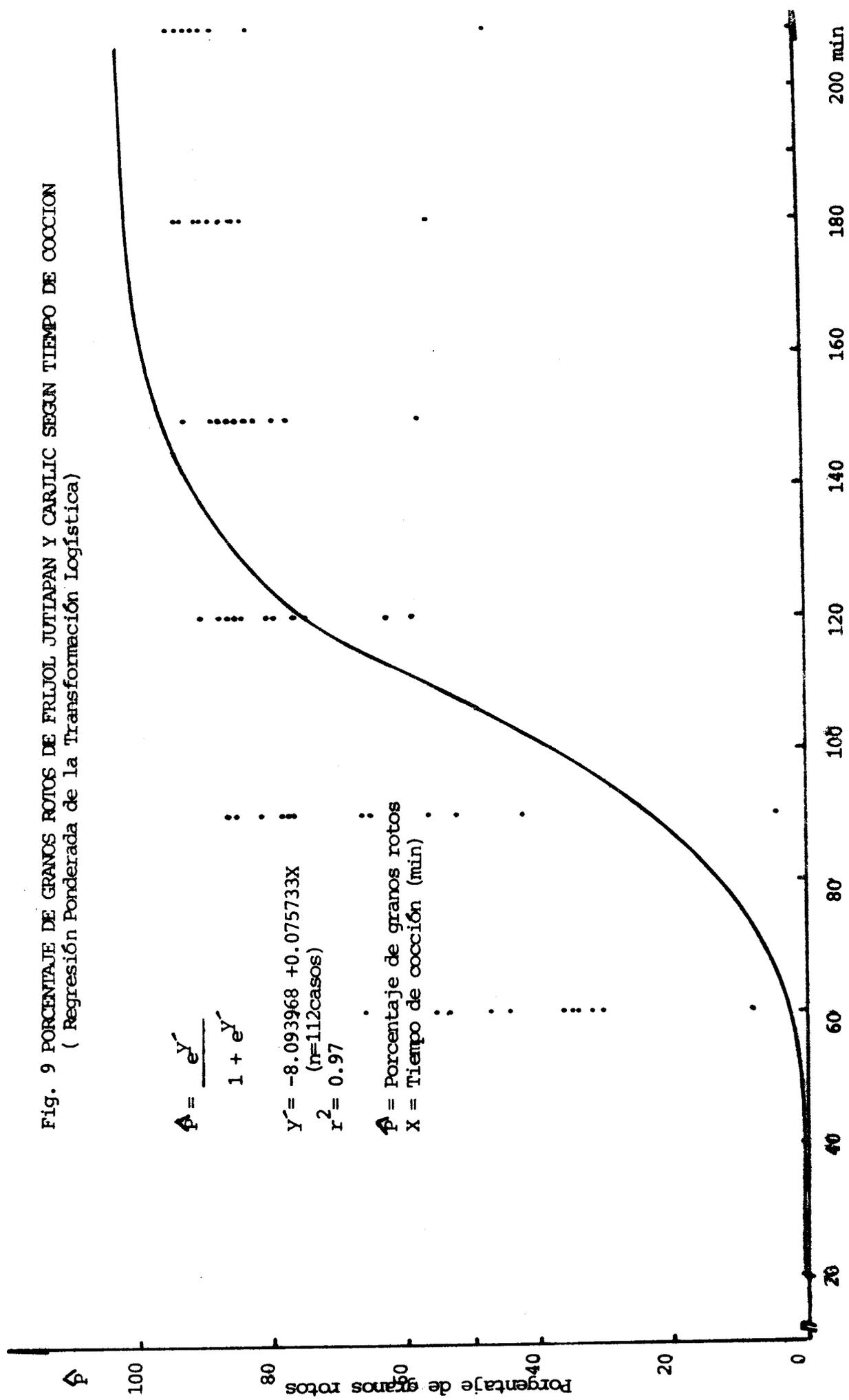
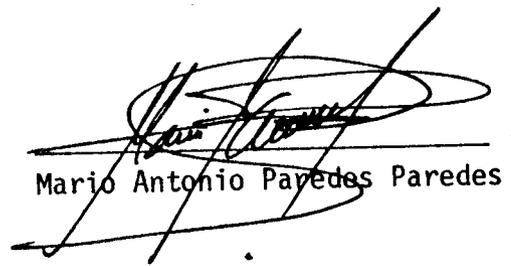


Fig. 8 ANGULOS DE INCLINACION DE LOS REFLECTORES EN FUNCION DE LAS HORAS DEL DIA

Fig. 9 PORCENTAJE DE GRANOS ROTOS DE FRIJOL JUTIAPAN Y CARJILIC SEGUN TIEMPO DE COCCION
 (Regresión Ponderada de la Transformación Logística)





Mario Antonio Paredes Paredes

Vo.Bo. Comité de Tesis



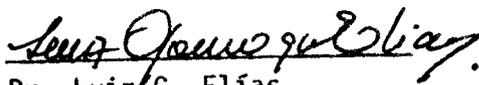
Dr. Mario R. Molina



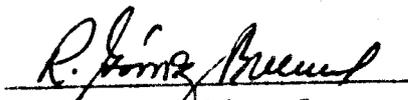
Dr. Ricardo Bressani



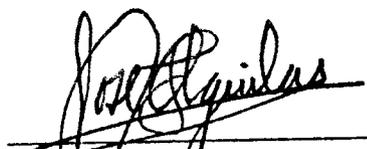
Dr. J. Edgar Braham



Dr. Luiz G. Elías



Dr. Roberto Gómez Brenes

Imprímase: 
Dr. José Héctor Aguilar A.
Decano de la Facultad de
Ciencias Químicas y Farmacia