

UNIVERSIDAD AUTONOMA METROPOLITANA

 COORDINACION DE SERVICIOS
DOCUMENTALES - BIBLIOTECA



Casa abierta al tiempo

**PROPIEDADES FISICOQUIMICAS Y DE
PANIFICACION DE DOS VARIEDADES DE
TRIGO (*Triticum aestivum*) SECADAS POR
LECHO FLUIDIZADO**

T E S I S

Que para obtener el grado de:
DOCTOR EN CIENCIAS BIOLÓGICAS
P r e s e n t a
LILIA DEL CARMEN VAZQUEZ CHAVEZ

México, D.F.

Enero 2002

17 1159/02 122

El jurado designado por las
Divisiones de Ciencias Biológicas y de la Salud
de las Unidades Iztapalapa y Xochimilco
aprobó la tesis que presentó

LILIA DEL CARMEN VÁZQUEZ CHÁVEZ

El día 25 de enero del 2002

Comité Tutorial:

Tutor: Dr. Mario Vizcarra Mendoza.

Mario Vizcarra Mendoza

Asesor: Dra. Isabel Guerrero Legarreta

Isabel Guerrero Legarreta

Asesor: Dr. Alfredo Salazar Zazueta

Alfredo Salazar Zazueta

Sinodal: Dra. Ruth Pedroza Islas

Ruth Pedroza Islas

Sinodal: Dr. Humberto Hernández Sánchez

Humberto Hernández Sánchez

El doctorado en Ciencia Biológicas de la Universidad Autónoma Metropolitana está incluido en el padrón de postgrado de excelencia del CONACyT y cuenta con apoyo del mismo Consejo con el convenio PFP-20-93

C O N T E N I D O

	Página
RESUMEN	
SUMMARY	
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1.Hipótesis	4
1.2.Objetivos	
General	
Específicos	4
2. REVISION DE LITERATURA	5
2.1. Generalidades del trigo	5
2.1.1. Características	5
2.1.2. Producción mundial y en México	5
2.1.3. Especies de trigo cultivadas y criterios de clasificación	6
2.1.4. Gluten de trigo	9
2.2. Importancia del secado de granos	12
2.2.1. Condiciones de cosecha del trigo	12
2.2.2. Secado de granos	12
2.2.3. Parámetros que influyen en el secado de granos	13
2.2.4. Riesgos del secado de granos	15
2.2.5. Proteínas de trigo sometido a tratamiento térmico	18
2.2.6. Secado de granos.	18
2.2.7. Mecanismos de secado	18
2.2.8. Determinación de humedad	19
2.2.9. Curvas de secado	20
2.2.9.1. Proceso de velocidad constante de secado	21
2.2.9.2. Proceso de velocidad decreciente de secado	21
2.2.10. Secado natural y artificial	24
2.2.11. Equipo de secado	25
2.2.12. Secador de lecho fluidizado	25
2.3 Fluidización	26
2.3.1 Estudio hidrodinámico	27
2.3.2. Clasificación de sólidos	28
2.3.3. Mapeo de régimen de fluidización	29
2.4. Calidad física, química, reológica y de panificación del trigo y sus harinas	29
2.4.1 Criterios de calidad industrial del trigo	29
2.4.2. Calidad física del grano	29
2.4.2.1. Tamaño y forma del grano	29
2.4.2.2. Peso de 1000 granos	29
2.4.2.3. Peso hectolítrico	30

2.4.2.4.	Densidad relativa	30
2.4.2.5.	Índice de dureza	30
2.4.3.	Calidad química de granos y harinas	31
2.4.3.1.	Humedad	31
2.4.3.2.	Cenizas	31
2.4.3.3.	Proteína total, soluble y determinación de gluten	31
2.4.3.4.	Rendimiento molinero	32
2.4.4.	Propiedades físicas o reológicas de las masas de trigo	32
2.4.4.1.	Farinógrafo de Brabender	32
2.4.4.2.	Extensógrafo de Brabender	33
2.4.4.3.	Alveógrafo de Chopin	34
2.4.4.4.	Mixógrafo de Swanson	35
2.4.4.5.	Pruebas de panificación	36
2.4.4.6.	Electroforesis	37
3.	JUSTIFICACIÓN	39
4.	METODOLOGÍA	41
4.1	Materiales y métodos	41
4.1.1.	Variedades de trigo	41
4.1.2.	Toma de muestra	41
4.1.3.	Limpieza de trigo	41
4.1.4.	Trigo control	41
4.1.5.	% de humedad del trigo	41
4.1.6.	Acondicionamiento del trigo	41
4.1.7.	Equipo experimental de secado lecho fluidizado	42
4.1.8.	Caracterización física del grano importante para lecho fluidizado	43
4.1.8.1.	Diámetro equivalente	43
4.1.8.2.	Diámetro promedio	43
4.1.8.3.	Esfericidad	43
4.1.8.4.	Densidad empacada y aparente	44
4.1.8.5.	Fracción vacía de empaque	44
4.1.9.	Cinética de secado	45
4.1.9.1.	Ecuación de Arrhenius	45
4.1.10.	Determinaciones físicas de calidad del grano	45
4.1.10.1.	Porcentaje de humedad del grano	45
4.1.10.2.	Peso hectolítrico	45
4.1.10.3.	Peso de 1000 granos	46
4.1.10.4.	Dureza del grano	46
4.1.10.5.	Rendimiento molinero	46
4.1.11.	Pruebas químicas de calidad de las harinas	46
4.1.11.1.	Humedad	46
4.1.11.2.	Cenizas	46
4.1.11.3.	Porcentaje de proteína	46
4.1.11.4.	Sedimentación	46

4.1.11.5.	Gluten	47
4.1.11.6.	Proteína soluble en Na Cl	47
4.1.12.	Características físicas de las masas de trigo	47
4.1.12.1.	Farinógrafo Brabender	47
4.1.12.2.	Extensógrafo Brabender	47
4.1.12.3.	Alveógrafo Chopin	48
4.1.12.4.	Mixógrafo Swanson	48
4.1.12.5.	Pruebas de panificación	48
4.1.13	Prueba de electroforesis	49
4.1.13.1	Preparación de reactivos de electroforesis	49
5.	DISEÑO EXPERIMENTAL	52
5.1	Proceso de secado y calidad industrial del trigo	52
5.1.1.	Primer bloque experimental	52
5.1.2.	Segundo bloque experimental	52
5.1.3.	Tercer bloque experimental	53
6.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	56
6.1	Secado de trigo por lecho fluidizado	56
6.1.1.	Caracterización física e hidrodinámica del trigo	56
6.1.2	Cinética de secado	56
6.1.3.	Ecuación de Arrhenius	62
6.1.4.	Análisis de varianza cinética de secado.	64
6.1.4.1.	Primer bloque experimental (análisis varianza)	64
6.1.4.2.	Segundo bloque experimental (análisis varianza)	64
6.1.4.3.	Tercer bloque experimental (análisis varianza)	66
6.1.5.	Análisis de medias prueba de Tukey	68
6.2.	Efecto de secado sobre la calidad del trigo	68
6.2.1.	Primer experimento	68
6.2.1.1.	Pruebas físicas	68
6.2.1.1.1.	Peso hectolítrico	68
6.2.1.1.2.	Peso de 1000 granos	69
6.2.1.1.3.	Dureza del grano	70
6.2.1.2.	Rendimiento Molinero	71
6.2.1.3.	Pruebas físicas y químicas de las harinas	72
6.2.1.3.1.	Cenizas	72
6.2.1.3.2.	Proteína harina	72
6.2.1.3.3.	sedimentación de harina de trigo	73
6.2.1.3.4.	Porcentaje gluten	74
6.2.1.4.	Pruebas reológicas de calidad de masas de trigo	76
6.2.1.4.1.	Farinografo	76
6.2.1.4.2.	Extensógrafo	78
6.2.1.4.3.	Alveógrafo	81
6.2.1.4.4.	Mixografo	83
6.2.1.5	Volumen de pan	86

6.2.2.	Segundo experimento	88
6.2.2.1.	Pruebas físicas	88
6.2.2.1.1.	Peso hectolítico y dureza del grano	88
6.2.2.2.	Calidad química de harinas	91
6.2.2.2.1.	Contenido de proteína de harina	91
6.2.2.3.	Características de calidad masas de trigo	91
6.2.2.3.1.	Alveografo	91
6.2.2.3.2.	Mixografo	93
6.2.2.4.	Prueba panificación	84
6.2.3.	Tercer experimento	96
6.2.3.1.	Propiedades físicas de los granos	96
6.2.3.2.	Solubilidad en NaCl de la proteínas de harina de trigo	98
6.2.3.3.	Mixografo	100
6.2.3.4.	1.2.3.4. Volumen del pan.	101
6.2.5.	Determinación electroforética de las proteínas de harina de trigo	103
7.	CONCLUSIONES	116
8.	BIBLIOGRAFÍA	118
9.	ANEXO 1. Análisis secado de trigo ecuación de Arrhenius	126
10.	ANEXO 2. Publicaciones derivadas de la tesis	160

TABLAS

Páginas

1.- Producción superficie sembrada y rendimiento por hectárea en el mundo	6
2.- Producción superficie sembrada y rendimiento por hectárea en México	6
3.- Clasificación y usos de trigos Mexicanos	8
4.- Composición química proximal trigo	9
5.- Fracciones proteicas del trigo	10
6.- Humedad del grano y temperatura de secado	13
7.- Temperaturas de secado del grano	14
8.- Revisión bibliográfica sobre el secado y calidad del trigo	17
9.- Conceptos de calidad en trigo pruebas físicas y químicas	31
10.- Conceptos de calidad molinera reológica y de panificación del trigo	37
11.- Diseño experimental cinética de secado	54
12.- Diseño experimental calidad del trigo	54
13.- Propiedades físicas del trigo	56
14.- Valores hidrodinámicos del trigo	56
15.- Constante de velocidad de secado y energía de activación de diferentes temperaturas y 1h de secado	63
16.- Constante de velocidad de secado y de energía de activación de diferentes tiempos y temperaturas	63
17.- Análisis de varianza cinética de secado primer experimento	64
18.- Análisis de varianza cinética de secado segundo experimento	65
19.- Análisis de varianza cinética de secado tercer experimento	66
20.- Análisis de medias prueba Tukey primer experimento	66
21.- Análisis de medias prueba Tukey segundo experimento	67
22.- Análisis de medias prueba Tukey tercer experimento	67
23.- Peso hectolítrico respecto a variedad de trigo	68
24.- Peso hectolítrico respecto a temperatura	69
25.- Peso de 1000 granos respecto a variedad de trigo	69
26.- Peso 1000 granos respecto a temperatura	70
27.- Índice de dureza respecto a variedad de trigo	70
28.- Índice de dureza respecto a temperatura	71
29.- Rendimiento molinero respecto a variedad de trigo	71
30.- Rendimiento molinero con respecto a temperatura	72
31.- Porcentaje de cenizas de harina respecto a variedad de trigo	72
32.- Porcentaje de cenizas de harina respecto temperatura	72
33.- Porcentaje de proteína de harina respecto a variedad de trigo	73
34.- Porcentaje de proteína harina respecto a temperatura	73
35.- Sedimentación de harina respecto variedad de trigo	73
36.- Sedimentación de harina respecto temperatura	74
37.- Porcentaje de gluten de harina respecto variedad de trigo	74
38.- Porcentaje de gluten de harina de trigo respecto a temperatura	75
39.- Características masas de trigo medidas con farinografo respecto a variedad de trigo	76
40.- Características de masas de trigo medidas con farinografo respecto	

a temperatura de secado	77
41.- Características de masas de trigo medidas con extensografo respecto a variedad de trigo	79
42.- Características de masas de trigo medidas con extensografo respecto a temperatur de secado	79
43.- Características de masas de trigo medidas con Alveografo respecto a variedad de trigo	81
44.- Características de masas de trigo medidas con Alveografo respecto a temperatura de secado	81
45.- Características de masas de trigo medidas con mixógrafo respecto a variedad de trigo	83
46.- Características de masas de trigo medidas con mixógrafo respecto a temperatura de secado	83
47.- Volumen del pan respecto a variedad de trigo	86
48.- Volumen del pan respecto a temperatura de secado	86
49.- Peso hectolítrico y dureza del grano respecto a variedad de trigo, temperatura y %humedad	88
50.- Peso hectolítrico respecto a temperatura y % humedad	89
51.- Dureza del grano respecto a temperatura y %humedad	90
52.- Porcentaje de proteína harina respecto a variedad de trigo, temperatura de secado y % humedad	91
53.- Porcentaje de proteína harina respecto a temperatura y %humedad	91
54.- Características de masas medidas con alveografo respecto a variedad de trigo temperatura de secado y %humedad	92
55.- Características de masas de trigo medidas con alveografo respecto a temperatura de secado y % humedad	93
56.- Características de masas de trigo medidas con mixografo respecto a variedad, de trigo temperatura y %humedad	94
57.- Características de masas de trigo medidas con mixografo respecto a temperatura de secado y %humedad	94
58.- Volumen de pan respecto a variedad de trigo, temperatura y %humedad	95
59.- Volumen de pan respecto a temperatura y %humedad	95
60.- Peso hectolítrico y dureza del grano respecto a variedad de trigo, %humedad, tiempo y temperatura de secado	97
61.- Peso hectolitrico y dureza del grano respecto a %humedad, tiempo y temperatura de secado	97
62.- Solubilidad proteína en NaCl respecto a variedad de trigo, % humedad, tiempo y temperatura de secado	98
63.- Solubilidad de proteína respecto a %humedad, tiempo y temperatura de secado	99
64.- Características de mezclado de masa de trigo respecto a variedad de trigo, %humedad, tiempo y temperatura de secado	100
65.- Características de mezclado de masa de trigo medido con mixografo respecto a %humedad, tiempo y temperatura de secado	101
66.- Volumen de pan respecto a variedad de trigo, %humedad, tiempo y	

temperatura de secado	102
67.- Volumen de pan respecto a %humedad, tiempo y temperatura de secado	103
68.- Alturas relativas de los picos del desitogramas trigo variedad Oasis	107
69.- Alturas relativas de los picos del desitogramas trigo variedad Salamanca	107

FIGURAS

Paginas

1.- Contenido de humedad	18
2.- Curva de secado de un sólido	19
3.- Perfiles de humedad dentro de la partícula esférica	22
4.- Cinética de secado correspondiente al período de velocidad de secado	23
5.- Cálculo de la energía de activación y el factor exponencial	24
6.- Clasificación de sólidos	27
7.- Mapeo de régimen de fluidización	28
8.- Esquema de farinograma típico	33
9.- Esquema de extensograma típico	34
10.- Esquema de Alveograma típico	35
11.- Esquema de Mixograma típico	36
12.- Equipo experimental de secado en lecho fluidizado	42
13.- Dimensiones del grano de trigo	43
14.- Metodología general	55
15.- Curvas de secado primer bloque experimental	57
16.- Curvas de secado segundo bloque experimental	58
17.- Curvas de secado tercer bloque experimental	59
18.- Gluten trigo variedad Oasis y Salamanca	60
19.- Farinogramas trigo variedad Oasis y Salamanca	78
20.- Extensograma trigo variedad Oasis y salamanca	80
21.- Alveogramas trigo variedad Oasis y Salamanca	82
22.- Mixogramas trigo variedad Oasis y Salamanca	85
23.- Volumen de pan trigo variedad Oasis y Salamanca	87
24.- Patron electroforesis de proteínas de harina de trigo con SDS y SDS mercaptoetanol	104
25.- Diagramas densitométricos trigo Oasis sin mercaptoetanol	108
26.- Diagrama densitométrico trigo Oasis con mercaptoetanol	110
27.- Diagrama densitométrico trigo Salamanca sin mercaptoetanol	112
28.- Diagrama densitométrico trigo Salamanca con mercaptoetanol	114

RESUMEN

Se evaluaron las características fisicoquímicas y de panificación de dos variedades de trigos comerciales, Oasis F89 de textura dura y gluten fuerte y Salamanca S75 de textura suave y gluten débil, que fueron secadas por lecho fluidizado a diferentes tiempos y temperaturas. El trabajo se desarrollo en tres etapas 1) Muestras representativas de 1kg de cada variedad de trigo, se humedecieron 22% y se sometieron a tratamiento térmico a 40, 60, 80 y 100°C por 60 minutos en todos los casos. Se usó un secador de lecho fluidizado a nivel de laboratorio con aire de 0.008 kg H₂O/kg de aire seco y una velocidad superficial de 1.52 m/s. A los granos después del secado se les determinó, peso hectolítrico, dureza, peso de 1000 granos. A las harinas obtenidas a partir del grano se les determinó contenido de proteína total, de gluten y de cenizas, a las masas de trigo pruebas reológicas, medidas con el farinógrafo y extensógrafo de Brabender, con el alveógrafo de Chopin y con el mixógrafo de Swanson, por último se determinaron las características del pan. 2) Las variedades de trigo se ajustaron a 17, 25 y 37 %h y se secaron bajo las mismas condiciones del primer experimento. Se determinó la cinética de secado y la energía de activación según la ley de Arrhenius. A los granos después del secado se les determinó peso hectolítrico y dureza. A las harinas, contenido de proteína total, a las masas de trigo pruebas reológicas (medidas con alveógrafo de Chopin y mixógrafo de Swanson), y al pan sus características. 3) Las dos variedades de trigos con 20 y 15 %h se secaron a temperaturas de 40, 60, 70, 80 y 100°C hasta alcanzar humedades finales de entre 11 y 9%. Se realizaron las cinéticas de secado y la determinación de la energía de activación. A los granos se les determinó, peso hectolítrico y dureza, a las harinas, proteína soluble en NaCl, a las masas de trigo sus características, medidas con mixógrafo de Swanson y al pan su volumen. Finalmente se realizó análisis electroforético a las harinas de trigo. En general la temperatura de secado mostró mayor efecto significativo sobre la calidad industrial del trigo que la humedad inicial del grano y la variedad del trigo. Los valores del peso hectolítrico y dureza (textura) fueron significativos ($p < 0.05$) entre variedades, contenido de humedad del grano y temperaturas de secado. Los contenidos de cenizas y de proteína total de las harinas solo presentaron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre variedades, indicando

entre variedades, indicando que el tratamiento térmico del trigo no afectó el contenido total de nitrógeno proteico ni el de minerales de las harinas. Los porcentajes de gluten y la concentración de proteína soluble, fueron significativos ($p < 0.05$) entre variedades y temperaturas, disminuyendo en relación directa con el aumento de temperatura. Las características reológicas de las masas de trigo presentaron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre variedades, temperaturas y contenido de humedad del grano, mostrando cambios en relación directa con el grado de desnaturalización del gluten y el volumen del pan. La solubilidad en Na Cl de las proteínas del trigo disminuyó conforme la temperatura de secado aumentó. Ambas variedades de trigos secadas a 40, 60 y 70°C reportaron valores semejantes a los del trigo control correspondiente. Por el contrario el tratamiento térmico drástico a 80 y 100°C reportó masas de trigo menos elásticas, de mala calidad panadera con leudado deficiente o nulo. Los resultados mostraron gluten más resistente al tratamiento térmico para el trigo Oasis con 9% de proteína que para el trigo suave de la variedad Salamanca con 8%. El análisis electroforético realizado a las harinas de trigo sometido a tratamiento térmico mostró que los cambios medidos pueden ser atribuidos principalmente a la desnaturalización térmica de las proteínas del gluten.

SUMMARY

The effect of fluidized bed drying on the physicochemical characteristics of two wheat varieties, used in the breadmaking industry, was studied. The two varieties were a hard texture, strong gluten Oasis F89 wheat, and a soft texture, weak gluten Salamanca S75 wheat. The study consisted into three experimental parts: 1) Initial moisture content of two wheat varieties was adjusted to 22% (dry basis); drying was carried out at 40, 60, 80 and 100°C during 60 min. Each batch was humidified and subjected to heat treatment in a batch scale fluidized-bed dried. Drying conditions were: air moisture content: 0.008 kg H₂O/kg dry air, velocity at the surface: 1.52 m/s. Drying kinetics was obtained for the experimental condition. Grains were analyzed for hectoliter weight, hardness, weight of 1000 grains and milling yield. The flour obtained from the dried grain was analyzed for protein content, dry gluten, ashes and sedimentation rate; rheological test were determined in the dough using a Brabender farinograph and amylograph, Chopin alveograph, and Swanson mixograph. Finally the loaf volume was determined. From these analysis several quality determinations were concluded to be the most suitable for the next part. 2) The two wheat varieties were adjusted to 17, 25 and 37% moisture content (dry basis) and dried at the same temperature and time as described for the first part. Drying kinetics were studied obtaining the activation energy according to the Arrhenius equation. The grain obtained after drying were analyzed for hectolitre weight and hardness; the flour was analyzed for protein content and sedimentation rate, and the dough for rheological parameters (as obtained from Chopin alveograph and Swanson mixograph); loaf volume was also determined. 3) the two varieties, with 15 and 20 % initial moisture content, were dried at 40, 60, 80 and 100°C and different time periods until reaching 9 to 13% final moisture content. In this part, drying kinetics and activation energy were also obtained. The dried grain was analyzed for hectoliter weight and hardness; the flour for total protein content and protein soluble in NaCl; the dough was analyzed with a Swanson mixograph and for loaf volume. Protein in the flour was analyzed by electrophoresis. The results showed that temperature was the most significant effect on wheat industrial quality. Wheat variety and initial moisture content were significant in a lesser extent. Hectolitre weigh and hardness were significant

($p < 0.05$) for wheat varieties, moisture content and drying time. Grain hardness was more affected by heat treatment than hectoliter weight, but did not efficiently detect damage in the grain. Ash and total protein content had significant differences ($p < 0.05$) between varieties, showing that thermal treatment did not affect total protein nitrogen nor mineral content. Gluten and soluble protein content were also significant ($p < 0.05$) for wheat variety, time and temperature, decreasing as the temperature increased. Wheat rheological characteristics showed significant differences ($p < 0.05$) for variety, temperature moisture content and drying time. Rheological analysis showed that changes in wheat dough viscoelastic properties was directly correlated to the gluten denaturation degree, as estimated by changes in the loaf volume. The protein soluble in NaCl decreasing as the temperature increased. When both wheat varieties were dried at 40 °C, 60°C and 70°C they showed values similar to those obtained with the respective control. Extreme heat treatment (80 and 100°C) rendered low breadmaking quality flours with deficient of none leavening capacity. In addition, more resistant gluten for heat treatment was observed in 9% protein Oasis variety than for 8% protein Salamanca variety, dried at different temperatures. Electrophoresis suggested that changes in severe heat-treated wheat may be due to gluten thermal denaturation.

1. INTRODUCCIÓN

El trigo por ser un alimento básico en muchos países, se encuentra entre las plantas alimenticias que más se cultivan a nivel mundial. Este cereal prospera en diversos climas, suelos y latitudes, desde el Ecuador (a grandes alturas) hasta los 67°N en Noruega y los 45°S en Argentina a 3500msnm; generalmente se desarrolla adecuadamente en las zonas templadas donde los tipos de vegetación pueden ser pastizales, estepas y praderas. En nuestro país el clima permite que el trigo se seque naturalmente en el campo cosechándose con humedades de entre 11 y 14% (Contreras *et al.*, 1993). No obstante en épocas con clima lluvioso el grano puede alcanzar humedades de 18% y en condiciones de un mal manejo poscosecha puede llegar hasta un 40% (Kirleis *et al.*, 1982; Pomeranz, 1988). Por ello es importante secar los granos con aire seco. Haciendo necesario entonces realizar el secado de los granos con aire seco y caliente para asegurar su conservación durante el almacenamiento (Ghaly y Taylor, 1982; Giner y Calvelo, 1987; Bruce, 1992). El secado es un proceso que disminuye la humedad de los granos y contribuye a conservarlos. No obstante cuando el secado se lleva a cabo sin control adecuado de la temperatura la calidad industrial del trigo puede dañarse, la mayoría de las veces sin alteración visual del grano. Diversos investigadores han señalado que el daño térmico del trigo está directamente relacionado con la desnaturalización térmica de las proteínas principalmente las del gluten (Finney *et al.*, 1962; Hall, 1963; Ghaly *et al.*, 1973; Chistonsen, 1974, Booth *et al.*, 1980; Schofield *et al.*, 1983; Hayward, 1987; Lupano y Añon, 1987; Dexter *et al.*, 1989; Preston *et al.*, 1989; Giner *et al.*, 1991). El proceso de secado de los granos depende en gran medida del tipo de secador utilizado siendo los más comunes aquellos donde el aire caliente fluye a través de capas estacionarias de granos. En estos casos el control de temperatura se hace más difícil, en la medida que estos lechos son más profundos, generándose gradientes de humedad y temperatura en las diferentes zonas del secador que pueden afectar la calidad industrial del trigo (Bakker-Arkema *et al.*, 1978; Lupano y Añon, 1986; Tosi *et al.*, 1982; Preston *et al.*, 1989). Una alternativa interesante es el secado en lecho fluidizado ya que ofrece un tratamiento térmico con aire caliente rápido y seguro debido a que se alcanza una buena mezcla de los sólidos fluidizados sin

sobrecalentamiento de los mismos. Esto es benéfico ya que la temperatura arriba de la placa del distribuidor, es siempre uniforme, asegurándose así su control y en consecuencia evita que la calidad del trigo se dañe. (Bakker-Arkema *et al.*, 1978; Evans y Dermott, 1981; Ghaly y Van der Touw, 1982; Lupano y Añon, 1986; Giner y Calvelo, 1987). Tosi *et al.* (1982) propusieron temperaturas máximas de secado del trigo entre 58 y 66°C, dependiendo del contenido de humedad inicial del grano y del uso final que se le dará. Posteriormente Tosi *et al.* (1986) indicaron que granos destinados a semillas con humedades que oscilan entre 36.99 y 17.65% pueden ser secados a 49 y 62.8°C y si son destinados a panificación a 49.6 y 67.6°C, con tiempos de secado de entre 60 y 240 min respectivamente. Más recientemente Bruce (1992) indicó que los trigos secados a 65°C por 4h no mostraron daños en su calidad panadera, en cambio los trigos con humedades de entre 25 y 38% secados a 70 y 75°C respectivamente fueron dañados. Por otro lado Ghaly y Taylor (1982) y Ghaly y Sutherland (1984) estudiaron el secado de diferentes variedades de trigo señalando la importancia tanto de la textura del grano como de las propiedades del gluten. Como es sabido en México las variedades de trigos se clasifican en base a sus características de textura (dureza), proteínas y fuerza del gluten, así como a su comportamiento molinero y tipos de panificación (mecanizada, semi-mecanizada y artesanal) que depende tanto del contenido como de la calidad de la proteína del gluten presentando generalmente alto rendimiento en el campo pero baja calidad. Específicamente el estudio del secado de las variedades de trigo evaluadas es debido a que la industria molinera en nuestro país tiene grandes problemas para abastecer a la industria de la panificación, siendo frecuente el uso de distintas variedades de trigo para elaborar harinas con diferente potencial de panificación. En esta investigación se incluyeron dos variedades de trigo con dureza y calidad del gluten diferentes, pero con contenido de proteína similar, que refleja las características de los trigos en uso comercial. Basados en los trabajos de Lupano y Añon (1987) y Galhy y Taylor (1982), quienes determinaron el efecto térmico de secado tradicional sobre la calidad panadera en variedades de trigos Argentinos y Australianos con diferente calidad de gluten, se resaltan los cambios fisicoquímicos que sufrieron cada variedad de trigo que fue sometida al proceso de secado, se compararon con las características del trigo control correspondiente (que no fue sometido a proceso de secado) y de esta manera se pudo

observar más claramente el efecto de secado sobre cada variedad de trigo. Con respecto a los métodos usados para evaluar el daño térmico producido al trigo se ha determinado que las pruebas físicas del grano, las reológicas de las masas así como las características de panificación usadas para medir la calidad industrial del trigo también pueden ser aplicadas al trigo y sus harinas que fueron sometidos a tratamiento térmico (McDermott, 1971; Hook, 1980; Tosi *et al.*, 1986; Ghaly y Taylor, 1982; Preston *et al.*, 1989; Every, 1987). No obstante Nellist (1978) señaló que la mayoría las pruebas usadas para determinar la calidad del trigo son efectivas pero complicadas, siendo importante entonces seleccionar métodos adecuados que evalúen el daño térmico producido al grano, en función tanto de las condiciones del proceso aplicado, así como del uso final y la rapidez con la que la información se necesite. Para determinar el efecto del tratamiento térmico sobre las propiedades fisicoquímicas de las dos variedades de trigo seleccionadas se llevaron a cabo pruebas de calidad desarrolladas normalmente tanto en los laboratorios de calidad como en la industria molinera. Específicamente la prueba de panificación se realizó a ambas variedades de trigos (Oasis de textura dura y gluten fuerte y Salamanca de textura suave y gluten débil) debido a que generalmente estos trigos se utilizan para elaborar pan. Aun cuando la variedad de trigo Salamanca, se clasifica dentro del grupo 3 del sistema de comercialización, presenta un comportamiento bueno de panificación dependiendo del año agrícola y la calidad de la cosecha. Los criterios usados para seleccionar los diferentes parámetros de secado fueron: a) Dos variedades de trigo comerciales con textura y contenido de proteína diferentes (Oasis de textura dura y gluten fuerte y Salamanca de textura y gluten suave) que son ampliamente usadas en la industria molinera para producir harinas panificables; b) Contenidos de humedad del grano con los que pueden cosecharse; c) temperaturas de secado adecuadas para evitar el daño en la calidad del trigo además de altas temperaturas de secado para determinar claramente el efecto de un mal secado sobre la calidad del trigo; d) Tiempos de secado tanto fijos como variables de acuerdo a las temperaturas de secado

1.1. HIPÓTESIS

Se propone que la humedad inicial del grano así como la temperatura y tiempo de secado pueden modificar las características físicas, químicas, reológicas y de panificación de dos diferentes variedades de trigo secadas por lecho fluidizado.

1.2. OBJETIVOS

GENERAL

El objetivo de este trabajo fue evaluar la calidad fisicoquímica y de panificación de dos variedades de trigos, frecuentemente usadas en la industria molinera de nuestro país para producir harinas para diversos usos panificables tales como el trigo duro Oasis con gluten medio fuerte y el Salamanca de textura suave y gluten débil, con diferentes contenidos de humedad que fueron sometidas a tratamiento térmico en lecho fluidizado a diferentes tiempos y temperaturas de secado.

ESPECÍFICOS

- A) Desarrollar el estudio de secado por lecho fluidizado de dos variedades de trigo, con diferentes contenidos de humedad, aplicando diferentes temperaturas y secando por el tiempo, necesario para conseguir la humedad de equilibrio del grano que asegure su buen almacenamiento.
- B) A partir del secado de dos diferentes variedades de trigo llevar a cabo el estudio de las cinéticas de secado correspondientes
- C) Relacionar el proceso de secado por lecho fluidizado con diversos factores de calidad que marquen el deterioro producido al trigo por el tratamiento térmico tales como: Físicos de los granos como peso de mil granos, peso hectolítrico y dureza del grano. Químicos de las harinas como, porcentaje de cenizas, de proteína y de sedimentación. Físicoquímicos de las masas de trigo utilizando equipos como el farinógrafo, extensógrafo, alveógrafo y mixógrafo y de panificación (volumen del pan).

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Generalidades del trigo

2.1.1. Características.- El trigo es una planta originaria de Asia menor (Siria y Palestina) cuyo cultivo ha tenido gran importancia a lo largo de la historia de la humanidad, por ser uno de los alimentos básicos más consumidos. Desde el punto de vista botánico el trigo pertenece a la familia de las gramíneas y al género *Triticum*, clasificándose muchas especies pero sólo algunas a nivel comercial, tales como la *aestivum* (trigo común), *durum* (trigo macaroni) y *compactum*. Este grano es muy abundante en todo el mundo y prospera en diversos climas y suelos, se desarrolla adecuadamente en las zonas templadas donde los tipos de vegetación pueden ser pastizales, estepas, praderas y pampas. Prospera en las zonas secas que reciben entre 250 y 500 mm de lluvia al año y en zonas más húmedas donde la precipitación es de 500 a 750 mm (Kent, 1987). Las características agronómicas y su amplio rango de adaptabilidad hacen del trigo el cereal con mayor potencial para proveer de alimento a una gran población. Contribuye a la dieta mundial con más energía y más proteína que ningún otro cultivo alimenticio. Es el cereal de mayor consumo y constituye la materia prima básica de la industria molinera, que a su vez provee a la industria panadera, galletera y pastas para sopas (Orth y Bushuk, 1972). El consumo per capita de derivados del trigo en forma de harina en México ha venido aumentando desde 1970 de 29 kg anuales por persona, hasta 44 kg en 1999. En nuestro país la mayor parte de la producción de trigo (71%) se destina al consumo humano para la elaboración de diversos productos tales como el pan, las pastas para sopa y las galletas principalmente. Además se considera que el 17% de la producción se destina al consumo animal y el 12 % restante, corresponde a mermas producidas durante el transporte y a un mal almacenamiento del grano (Carvajal y Castillo, 1977).

2.1.2. Producción mundial y en México.- El cultivo del trigo a nivel mundial ocupa el primer lugar en producción entre los cereales básicos para la alimentación humana y animal con aproximadamente 500 millones de toneladas métricas y una superficie sembrada de aproximadamente 200 millones de hectáreas. En la tabla 1 se muestra

cómo ha evolucionado la producción, superficie sembrada y el rendimiento de este cultivo, durante la década de los años 90.

Tabla 1 Producción superficie sembrada y rendimiento por hectárea en el mundo (millones)

	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
Producción (ton)	197.6	171.8	408.6	411.2	394.2	404.2	434.9	448
Superficie sembrada (ha)	80.5	72.4	173.7	175.5	172.0	172.7	181.3	178
Rendimiento (ton/ha)	2.456	2.373	2.352	2.342	2.291	2.346	2.399	2.518

Fuente Fao 2000

En México, la producción, superficie sembrada y rendimiento por hectárea en la década de los años 90, se presenta en la tabla 2. La producción de trigo en nuestro país proviene de siembras comerciales de diferentes tipos de suelo, clima y altitudes, abarcando áreas comprendidas desde las fronteras con California y Texas (latitudes 32°N y 29°N, respectivamente) hasta los valles altos de Chiapas (latitud 16°N) y desde el nivel del mar, en Sonora y Sinaloa, hasta elevaciones de 3000 msnm en la parte central del país. La producción de trigo comprende tres principales regiones: el Noroeste, el Bajío y el Norte; la primera de ellas incluye los estados de Baja California, Sonora y Sinaloa con el mayor porcentaje de producción (69.4%). La región del Bajío aporta aproximadamente el 23.20% de la producción nacional y la región norte, contribuye aproximadamente con un 7.4% del total. Una menor producción está dispersa entre los estados de México, Hidalgo, Puebla, Tlaxcala y otros (Contreras y col., 1993).

Tabla 2 Producción superficie sembrada y rendimiento por hectárea en México (millones)

	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
Producción (ton)	3.93	4.06	3.62	3.58	4.15	3.47	3.37	3.64
Superficie sembrada (ha)	0.93	0.98	0.91	0.88	0.96	0.93	0.81	0.80
Rendimiento (ton/ha)	4.214	4.127	3.953	4.082	4.303	3.732	4.17	4.547

Fuente SAGAR2000

2.1.3. Especies de trigo cultivadas y criterios de clasificación.- Dos especies de trigo se cultivan principalmente en México: trigos hexaploides (trigos harineros) y trigos tetraploides (trigos cristalinos para la producción de semolina) (Chacón, 1975). Entre las dos especies existen diferencias agronómicas, genéticas y tecnológicas. El trigo

panificable *Triticum aestivum*, tiene 42 cromosomas formados por tres grupos de 7 pares (AA BB DD) y el trigo cristalino tetraploide, *Triticum durum*, con 28 cromosomas conocido como trigo duro macarronero tiene dos grupos de 7 pares cada uno (AA BB), cada grupo representa un genomio duplicado aportado por una especie ancestral bien diferenciado. La ausencia del genomio D en los trigo tetraploides hace que las proteínas del gluten no tengan las propiedades funcionales (panificación) aptas para la industria alimentaria (Bushuk, 1982; Pomeranz, 1988). Para propósitos comerciales los cultivares de trigo son clasificados en base a las características físicas como el aspecto (vitriocidad y opacidad) así como por la textura o dureza del grano (trigos suaves y duros), el color (trigo rojo, blanco o ámbar) y la época de siembra (trigo de primavera o de invierno) (Kent, 1987). La cualidad vítrea se asocia frecuentemente con la dureza y buenas cualidades de molienda. El peso específico de los granos duros y vítreos es mayor por lo general que el de los granos suaves y opacos o farináceos (Kent, 1987). El endospermo del trigo varía en textura (dureza) y en aspecto (cualidad vítrea) en general, los trigos duros ricos en proteínas, tienden a ser vítreos y los trigos blandos pobres en proteínas, tienden a ser opacos. (Hoseney, 1991). La dureza (característica de molienda) y fuerza del gluten (carácter en la panificación) se heredan separadamente. Por tanto debe ser factible mediante cruces, combinar la buena calidad molinera con la calidad para panificación. Los trigos que tienen la facultad de producir harina para panificación con piezas de gran volumen, buena textura de la miga y buenas propiedades de conservación tienen por lo general alto contenido de proteína y se llaman de gluten fuerte, mientras que los que dan harina con la que se consiguen panes pequeños con miga gruesa y abierta se caracterizan por su bajo contenido de proteína se llaman trigos de gluten débiles o suaves, ideales para galletas y pasteles. En nuestro país las variedades se agrupan en cinco grupos por sus propiedades físicas, químicas y tipo de utilización (tabla 3). Se basa en la clasificación física (textura del endospermo) y en las características de calidad del gluten (proteínas). El nombre de las variedades esta formado por un nombre seguido de una letra de dos dígitos. La letra identifica el tipo de gluten y grupo al que pertenece y los dígitos al año en que se liberó esa variedad por ejemplo: Oasis F89 (gluten fuerte, liberada en 1989), Temporalera M87 (gluten medio fuerte, liberada en 1987), Salamanca S75 (gluten suave, liberada en 1975) y Mochis T88

(gluten tenaz, liberada en 1988). La tabla 3 muestra la clasificación de trigos mexicanos en base al tipo de gluten. Los trigos del grupo I llamados generalmente trigos duros de gluten fuerte y extensible, son los más altos en proteína (2 y 13%) y en peso específico, con buena fuerza y elasticidad del gluten, excelente volumen del pan y buen rendimiento de harina ideales para la panificación mecanizada, en la elaboración de pan de molde (pan de caja) y como mejorante de trigos de gluten débil.

Tabla 3 Clasificación y usos de los trigos mexicanos

Grupo	Tipo gluten	tipo industria	Masa elaborada	Producto
I	fuerte y extensible	Mecanizada y mejora suaves	Tolera trabajo mecánico intenso	pan de molde
II	medio fuerte y extensible	proceso manual y semimecanizado	fermentables y no fermentables	pan blanco hojaldrado
III	débil y endospermo suave	y manual tolerancia mezclado	poca al débil extensible	galletas y repostería se pueden mezclar trigos fuertes
IV	tenaz (poco extensible)	poca tolerancia al sobremezclado	débil extensible	pobre calidad panadera requiere mezclas de trigo fuerte
V	medio fuerte tenaz(cristalino)	resiste amasado	Densa sin retención de gas	pastas /sopas

Fuente Salazar 2000

Su fuerza general (calidad del gluten), determinada por el análisis alveográfico es mayor de 300×10^{-4} Joules, por lo que produce masas que toleran el proceso de amasado mecanizado. Los trigos del grupo II de gluten medio fuertes con grano de textura semidura son más bajos en proteínas, en fuerza del gluten y produce pan de menor volumen que los trigos del grupo I, se usa para diferentes tipos de pan hecho a mano o de diversos productos leudados y en mezclas para la producción de harinas con diferente potencial de panificación. La fuerza general varía entre 200 y 300×10^{-4} Joules dependiendo del contenido de proteína. Los trigos del grupo III con variedades de gluten débil y endospermo suave excelentes características de molienda, de gluten elástico y extensible, tiempos de amasado corto, baja fuerza general y volumen del pan, son aptas para la industria galletera y de repostería. Se leudan con productos químicos con contenidos proteicos relativamente bajos de entre 10-11% para galletas y de entre 9.5 a 9 % para pasteles. El 90 % del total de la producción de trigos suaves se cosecha de

siembra comercial de la variedad Salamanca S75 en la región del Bajío. Los alveogramas se caracterizan por tener valores de fuerza general bajos (menores de 200×10^{-4} J). Los trigos del grupo IV con variedades de gluten tenaz y grano de textura dura con bajo contenido de proteína y buenas características de molienda. Su gluten es corto tenaz y son de baja calidad panadera. Su harina se utiliza para la elaboración de productos horneados de bajo volumen y también en la mezcla con trigos del grupo I. Los trigos del grupo V variedad de gluten corto, son los llamados trigos cristalinos o macarroneros ya que son extremadamente duros en textura de color ámbar y deben usarse principalmente para la fabricación de harina o semolina para pastas (Chacón, 1975; Carvajal y Castillo, 1977; Salazar *et al.*, 1990).

2.1.4. Gluten de trigo.- El gluten del trigo comprende un grupo de proteínas de reserva o almacenamiento que se localizan en mayor proporción en el endospermo del trigo. El gluten esta formado por una mezcla heterogénea de proteínas relacionadas, que representan el 80-90% de las proteínas de las harinas y están esencialmente formadas por dos grupos, las gliadinas (prolaminas) que son fracciones proteicas solubles en etanol al 70% y las gluteninas (glutelina) que son solubles en ácidos diluidos (MacRitchie, 1980b). Huebner y Rothfus (1968), Hosney *et al.* (1969) y Kent (1987) señalaron valores aproximados de composición del gluten estimando un 43% de gliadinas, un 39% de gluteninas, un 4.0% de otras proteínas (albúminas, globulinas y enzimas), lípidos del 2.0%, azúcares del 2.0%, almidón del 6.0% y el resto de celulosa y sustancias minerales. El contenido de proteína (gluten) y la calidad del trigo están directamente relacionados con las propiedades intrínsecas de las proteínas del gluten (Pomeranz, 1991). La tabla 4 muestra la composición química porcentual de diferentes tipos de trigo (Kent, 1987; Hosney, 1991).

Tabla 4 Composición química proximal del trigo

Trigo	Proteínas (%)	Lípidos (%)	Fibra cruda (%)	Cenizas (%)	Carbohidratos (%)
panadero	14.4	2.3	2.9	1.9	78.5
	11.5-17.0	1.8-2.8	2.8-3.0	1.8-2.0	75.2-82.1
Suave	9.9	2.8	2.7	1.7	82.9
	8.0-12.0	2.6-2.9	2.5-2.8	1.8-1.9	80.4-85.1
cristalino	13.2	2.8	2.8	2.0	79.2
	12.0-15.6	1.8-3.8	2.4-3.1	1.8-2.1	75.4-82.0

Valores expresados en materia seca. El número superior indica el valor promedio y el inferior se refiere al intervalo dentro del cual se encuentran generalmente los valores. Fuente Serna, (1996).

Específicamente el contenido del gluten depende de factores agronómicos y ambientales (variedad de trigo, suelo, fertilización, clima, enfermedades, lluvias, heladas y temperaturas de secado) y la calidad depende del genotipo (por lo tanto una variedad la hereda) (Pomeranz, 1988; Watson, 1970; Ghaly y Taylor, 1982;). Existen variaciones significativas en el total de proteína y fracciones proteicas en el endospermo de las diversas variedades de trigo con diferente potencial panificable. La tabla 5 muestra porcentajes de diferentes fracciones proteicas del trigo

Tabla 5 Fracciones proteicas del trigo

Trigo	Albúminas + globulinas (%)	prolaminas simples (%)	ligadas	Glutelinas (%)
panadero suave	16	45	45	35
panadero cristalino	15	49	49	32

Fuente Serna, (1996)

Es necesario que las harinas de trigo posean gluten en cantidad y calidad suficiente, para lograr que las harinas durante el proceso de panificación produzcan masas que atrapen la mayor cantidad de los gases de fermentación del azúcar formando burbujas en la matriz del gluten. Aunque la variedad de gluten fuerte por lo general tiene alto contenido de proteínas no se asegura una buena calidad de panificación (Hoseney, 1986). A mayor contenido de proteína en una variedad de trigo, el volumen de pan por unidad de proteína se incrementa. Sin embargo dos variedades diferentes con el mismo contenido de proteína pueden producir pan con diferente volumen (Orth y Bushuk, 1972). MacRitchie 1980b y Pomeranz 1991 indicaron que la composición de aminoácidos de las proteínas del gluten no está relacionada con la calidad panadera de la harina pero las propiedades reológicas de la masa dependen directamente del número y naturaleza de los enlaces cruzados que la forman. El grupo sulfhidrilo del aminoácido cisteína es muy reactivo y puede reaccionar con otro resto de cisteína para formar el enlace disulfuro. Este enlace confiere a la proteína su estructura secundaria. Los dos restos de cisteína, pueden estar en la misma cadena proteica (enlace intramolecular), formando un lazo en la proteína, o puede estar en diferentes cadenas proteicas (enlace intramolecular), uniendo dos cadenas peptídicas, dando al esqueleto de la proteína flexibilidad (Hoseney y Finney, 1971). La actividad de los enlaces iónicos, puentes de

hidrógeno, enlace hidrófobo y/o fuerzas de Van der Waals determina la estructura terciaria de la proteína. Por lo tanto el plegamiento y/o curvatura de las proteínas para establecer su estructura tridimensional definitiva está constituido por la secuencia de aminoácidos y es la estructura tridimensional de la proteína lo que determina sus propiedades. En general el gluten de trigo se caracteriza por altos contenidos en leucina, prolina, ácido aspártico y ácido glutámico. Es importante señalar que las características del gluten las dan la proporción de gluteninas y gliadinas y no el porcentaje de proteína total, aunque existe por lo general una correlación entre la fuerza del gluten y el contenido proteico, lo cual se debe a que al aumentar el contenido proteico en el mejoramiento genético aumenta la proporción de gluteninas y gliadinas. Estas dos fracciones proteicas, le confieren las propiedades viscoelásticas a las masas de las harinas de trigo y determinan su calidad de panificación (Bushuk, 1982). Las gliadinas son un grupo amplio de proteínas con propiedades similares, representan del 35 al 40% del total de las proteínas del gluten y le imparten las propiedades viscosas, son de cadena simple y son extremadamente pegajosas cuando están hidratadas. Las gliadinas son más solubles en agua en un rango de pH 6-9, lo que indica que es en este rango de pH que la red tridimensional, que forma las proteínas del gluten de trigo durante el proceso de panificación, exhiben sus propiedades cohesivas y elásticas más estables para la retención de gas (Chung y Pomeranz, 1978, 1979). El patrón electroforético de las gliadinas sirve como huella bioquímica del trigo; cada variedad tiene un patrón electroforético característico, que no varía ni con el contenido de proteína ni con las condiciones ambientales (Sarpinsein y Bushuk, 1985; Lookhart y Albers, 1988). Estudios electroforéticos han demostrado que las gliadinas constan de 30-40 polipéptidos, con pesos moleculares que van desde 15000 a 80000 daltones. Las glutelinas son menos solubles en agua, en un amplio intervalo de pH que las gliadinas y son las proteínas que sufren más cambios estructurales/moleculares durante el proceso térmico de secado. Estudios efectuados por Schofield *et al.* (1983), relacionados con el efecto de temperatura sobre la proteína del gluten indican que la fracción glutenina resulta ser más sensible al tratamiento por calor que la gliadina, produciendo cambios que involucran enlaces disulfuro que reducen drásticamente la calidad panadera y la capacidad germinativa del trigo. Son proteínas poco viscosas y parece ser también un grupo

heterogéneo de proteínas, son de cadena ramificada y su peso molecular oscila entre unos 100,000 y varios millones. Físicamente la proteína es elástica, pero no cohesiva. Las gluteninas confieren aparentemente a la masa su propiedad de resistencia a la extensión. Son la fracción más difícil de extraer por su alto peso molecular y por el alto número de enlaces disulfuro. Son las principales proteínas estructurales del endospermo. Básicamente se encuentran situadas dentro de la matriz proteica y asociadas con las prolaminas (Serna, 1996). Las gluteninas son solubles en solución ácida y muy soluble en soluciones que contengan dodecil sulfato de sodio por lo que para su extracción se requiere el uso de estos detergentes, así como de álcalis y/o mercaptoetanol (Khan y Bushuk, 1979a). Las glutelinas purificadas tienen pesos moleculares que van de 40000-100000 daltones y tienen la propiedad de agregarse, formando complejos moleculares de alto peso molecular (Pomeranz, 1971; Khan y Bushuk, 1979b). Las proteínas solubles en agua o en solución salina solubilizadas durante la separación del gluten son fundamentalmente albúminas y globulinas y en menor cantidad glicoproteínas y nucleoproteínas

2.2.Importancia del secado de los granos

2.2.1.Condiciones de cosecha del trigo.- En las principales zonas productoras de México Norte, Bajío y altiplano, el trigo se cosecha con humedades entre 11 y 14% (Contreras y col., 1993). No obstante en épocas con clima lluvioso el grano puede alcanzar humedades de 18% o más y en condiciones de un mal manejo poscosecha, puede llegar hasta un 40% (Kirleis *et al.*, 1982; Pomeranz, 1988). Por ello es importante secar los granos con aire seco y caliente, para asegurar su conservación durante el almacenamiento (Ghaly y Taylor, 1982; Giner y Calvelo, 1987; Bruce, 1992). Un grano recibido limpio y seco tendrá un mejor precio en la industria de transformación además de evitar su deterioro durante su conservación (Christensen, 1974). Por lo tanto el indicador más confiable para saber cuando se debe cosechar, es el contenido de humedad de los granos. Si los granos tienen alto contenido de humedad deberán ser secados inmediatamente a niveles de entre 10 y 13% de humedad para su seguro almacenamiento.

2.2.2.Secado de granos.- El objetivo del secado de los granos es conservarlos, manteniendo un nivel de humedad tal que evite el crecimiento de microorganismos

insectos y reacciones enzimáticas de descomposición (Multon, 1984; Pomeranz, 1988; Hayward, 1987). Además, si los granos son almacenados con altos niveles de humedad, se pueden originar calentamientos que los dañarán, afectando tanto su composición química como su aspecto físico. El secado de granos es una operación, en la que se elimina la humedad de los sólidos por evaporación en una corriente de aire generalmente a temperatura elevada y con un contenido de humedad menor al del sólido. Es decir es una operación en la que existe una transferencia simultánea de calor y masa.

2.2.3. Parámetros que influyen en el secado de granos.- Entre los parámetros que influyen el grado de daño por calor en los cereales generalmente están factores tales como: contenido inicial de humedad del grano, temperatura del aire de secado y tiempo de tratamiento entre otros factores importantes. Al aumentar cualquiera de estos parámetros sin un control adecuado se puede aumentar la posibilidad de dañar el grano (Dermott y Evans, 1978; Ghaly y Taylor, 1982; Ghaly y Sutherland, 1984). Es por tanto importante establecer las condiciones de operación para un correcto tratamiento térmico según las características del grano y fijar límites de seguridad de los diferentes tipos de secadores usados, así como límites de control dentro de los cuales la calidad del trigo no sea afectada (Becker y Sallans, 1960; Ghaly y Sutherland, 1984). Diversas investigaciones citan temperaturas máximas admisibles de secado para cereales que serán industrializados indicando que el contenido de humedad del grano incide en la magnitud de la temperatura máxima aceptable seleccionada; así para trigos con contenidos de humedad de 18 y 20 % las temperaturas máximas citadas son 44°C y 40°C respectivamente y para humedades de más de 20% temperatura máxima de 36°C (Tosi *et al.*, 1986).

Tabla 6 Humedad del grano y temperaturas de secado

%humedad	Temperatura máxima °C
18	66.5
20	60
22	56.8
24	52.8
>24	44

Fuente Tosi *et al.* (1986) y Nellist (1980)

Por arriba de un contenido de humedad de 25 a 30 %h se presentan un mayor porcentaje de granos rotos y baja calidad molinera y panadera por lo que se recomienda secar por abajo de 60°C para mantener la calidad del grano (Finey *et al.*, 1962; Hayward, 1987). Las temperaturas propuestas para distintas humedades, que van de entre 36.99 y 17.65%, varían de 49.0 a 62.8° C respectivamente, para granos destinados a semilla y de 49.6 a 67.6° C para grano destinado a panificación (Tosi *et al.*, 1985). Se ha indicado que la temperatura y tiempo de secado de los granos están directamente relacionados con el contenido de humedad del grano de tal manera que cuando ésta es alta (25-30%) la temperatura deberá ser baja (entre 40-45°C) (Ghaly *et al.*, 1973; Nellist, 1980). Como la temperatura es un factor importante en el diseño y funcionamiento de los secadores de granos, los niveles de este parámetro están condicionados al uso que se le pretenda dar a la semilla deshidratada. En la tabla 7 se presentan algunos de las temperaturas usadas para secar granos según vaya a ser su uso, menor temperatura para semilla (40°C) que la usada para secar grano para panificar (45-50°C) (Brooker *et al.*, 1975; Tosi *et al.*, 1986). Se ha recomendado que la temperatura de secado del grano no supere los 60°C si ha de utilizarse para panificación (Bruce, 1992). La mayoría de los estudios relacionados con el tratamiento térmico del trigo indican que el secado puede aumentar la calidad de los granos, en cierta dirección pero también puede dañarlos (Lupano y Añon, 1986).

Tabla 7 Temperaturas para el secado de granos.

Uso del grano	Temperatura máxima recomendada (°C).
Granos uso animal	82
Granos para industrialización	57-60
Granos para semilla	40-45

Fuente: Brooker *et al.*, (1975); Tosi *et al.*, (1986)

Durante el secado del trigo es importante controlar la temperatura del grano ya que la exposición a temperaturas demasiado altas afecta seriamente la calidad molinera y panadera del trigo teniendo como consecuencia la obtención de harinas de mala calidad panadera (Kirleis, 1982; Hook, 1980). Junto con el tratamiento térmico se han desarrollado numerosos métodos para medir la calidad del trigo que fue sometido a tratamiento térmico. El método puede ser seleccionado en base al uso final que se le dará al trigo y a la velocidad con la cual se necesite la información. La mayoría de las

pruebas para determinar el daño por el calor, incluyen pruebas que determinan cambios debidos a la desnaturalización térmica de las proteínas (Ghaly y Sutherland, 1984; Lupano y Añón, 1988). Estos métodos son efectivos pero complicados de realizar y difíciles de comparar (Harrison *et al.*, 1969; Bruce 1992; Hook, 1980). Galy y Taylor (1982) propusieron métodos para detectar daño por calor en trigos basado en la capacidad germinativa en relación de su respiración pero se requieren de tres o cuatro o hasta 7 días para obtener resultados. Hook (1980), Every (1987), Lupano y Añón (1988) y Eynard *et al.* (1994), propusieron pruebas para determinar la solubilidad de la proteína y medir el daño por calor del trigo indicando que la desnaturalización térmica de la proteína del trigo reduce la solubilidad de la proteína en varios solventes (Bradford, 1976). Finney *et al.* (1962) determinaron que las propiedades físicas de la masa son alteradas al aumentar progresivamente la temperatura de secado; Tosi *et al.* (1986) mostraron cambios en las propiedades físicas de la masa. En general la determinación de las propiedades reológicas de las masas se ha usado para determinar el efecto del tratamiento térmico sobre la calidad del trigo (MacDermott, 1971; Hook, 1980; Preston *et al.*, 1989). Srivastavaka y Haridas (1994) indicaron que una de las prueba más exactas para determinar el efecto del tratamiento térmico sobre el trigo es la prueba de panificación (Draper y Stewart, 1980).

2.2.4. Riesgos del secado de granos. El secado de granos involucra riesgos sobre la calidad industrial del grano con la pérdida de sus propiedades funcionales debido a los tratamientos térmicos rápidos con altas temperaturas muchas veces sin cambios aparentes del grano a simple vista (Ghaly *et al.*, 1973; Lupano y Añón, 1987). El secado reduce el peso y volumen del grano pudiendo alterar su calidad. Esto es más serio si el grano es usado para semilla ó en el caso del trigo usado para panificación (Tosi *et al.*, 1982). Para el secado de los granos normalmente se usan equipos de secado continuo, donde la cama de grano interactúa con el aire de secado en corriente directa, contracorriente o flujo cruzado. El control de temperatura del grano en este tipo de secado es difícil ya que existen importantes gradientes de temperatura y humedad en diferentes zonas del equipo. De igual forma bajo condiciones específicas de operación tal como sucede en los secadores donde se almacena el grano también puede ocurrir sobrecalentamiento a través del grano estacionario por irregularidad en la

heterogeneidad del secado. Esto conduce a una falta de uniformidad en el secado del grano y por tanto en el daño térmico del grano afectando la viabilidad de la semilla así como su calidad industrial (Lupano y Añón, 1986). En general, el secado es más rápido, cuando el contenido de humedad del grano es alto y la temperatura del aire es alta y su humedad relativa baja. La duración del secado es difícil de predecir, el proceso es influenciado significativamente por el tipo de grano, contenido de humedad inicial y final, temperatura y flujo de aire. Si el tiempo de secado es muy rápido a altas temperaturas el calor excesivo puede matar el embrión de la semilla. El sobresecado hace más susceptible a la semilla al daño mecánico y al estrellamiento de su cubierta. Si por el contrario el secado es muy lento; pueden ocurrir los ataques de microorganismos en las capas superiores, declinación de la germinación y sobre todo falta de uniformidad en el secado final. Lo anterior sugiere, la determinación de una temperatura y tiempo óptimo de secado para cada situación en particular. Las desventajas de un secado con altas temperaturas producirá agrietamiento del grano por tensión acentuando el estado quebradizo y susceptibilidad a la fractura, cambiando la densidad del conjunto y pérdida del poder germinativo. La tabla 8 muestra algunas de las investigaciones que se han venido haciendo con respecto al secado del trigo y el efecto sobre sus propiedades fisicoquímicas y de panificación.

Tabla 8 Revisión Bibliográfica secado de trigo y calidad

<i>Investigadores</i>	<i>%Hi</i>	<i>T °C</i>	<i>tiempo</i>	<i>Características</i>
Hutchinson (1944) trabajó secando trigo ingles y determino calidad	12 y14	64-68-70-85	60-24 36min	% germinación disminuye Galletas
Rasner (1959) trabajó trigo suave y determinó calidad	13-19	54		
Lindberg y Sorensen (1959) trabajaron secando trigo y determinando calidad	36.99 17.6	49 49.6 67.6	no reporta	semillas panificación
Becker y Sallans (1960) ecuación 1er orden: Rel %h, T.t en función volumen del pan	15-16	63	66	panificación
Finey <i>et al.</i> (1962) trabajaron con trigo rojo duro de diferente madurez y %humedad en secado por convección	27 12.4	40 60	no reporta	panificación
Ghaly <i>et al.</i> (1973) secador estacionario sobrecalentamiento localizado	15	70	22	disminuye calidad panadera relacionada con germinación
Brooker <i>et al.</i> (1975)		60		buena calidad
Ghaly y Taylor (1982) secaron trigo australiano suave 9,4%, duro 14.1% de proteína en lecho fluidizado	12 14	80 60	no reporta	temp mas significativo que tiempo
Ghaly y Van der Tow (1982) trabajaron con trigo suave 10%, duro de 11.5% y muy duro 11.1% de proteína secado en lecho fluidizado	12 14	70	no reporta	temp y %h mas significativo importante la variedad trigo menos significativo el tiempo
Tosi <i>et al.</i> (1982) propuso que a mayor %H menor debe ser la temperatura de secado	31.6 17.6	60 70		sin alterar la calidad panadera
Tosi <i>et al.</i> (1985) secaron trigo		58	5400s	
Tosi <i>et al.</i> (1986) trabajo con secador tipo cruzado para trigo	36.99 17.61 31.6	49 49.6 49.6 67.6	no reporta	semilla y panificación
		20-25		
Kirleis (1982) estudió trigo rojo de diferente % de humedad y madurez	17 16.2	41.8 37.5		calidad como semilla y de panificación
Lupano y Añon (1986) seco trigo argentino determinó cinética de secado y ecuación Arrhenius de 1er orden	16.9 25.5	110 125 140	15 65min	determinó deterioro de la proteína del germen
Lupano y Añon (1987) trabajaron con la energía de activación	21.1 34.8	110 125	15 65min	determinó máxima temperatura de desnaturalización proteína
Bruce (1992) propuso modelo difusional de 1er orden		65-80	1-4h	calidad panadera

2.2.5. Proteínas del trigo sometido a tratamiento térmico.- Aún cuando el mayor constituyente químico del grano y la harina de trigo es el almidón, la proteína es el componente directamente relacionado con las propiedades funcionales del trigo y por lo tanto con las alteraciones que puede sufrir el trigo durante el proceso de secado (Khan y Bushuk, 1979; Giner *et al.*, 1991). Los cambios en la proteína principalmente las del gluten del trigo sometido a tratamiento térmico se han correlacionado con las alteraciones en la pérdida de calidad panadera industrial del trigo (Booth *et al.*, 1980; Schofield *et al.*, 1983; Finney *et al.*, 1962; Preston *et al.*, 1989). Además las propiedades de panificación pueden ser modificadas por la interacción de otros componentes químicos, que forman el pan, tales como los carbohidratos, los cuales pueden también sufrir alteraciones durante el proceso de secado del trigo (Serna, 1996).

2.2.6. Secado de granos. Contenido de Agua. El agua que esta contenida en el sólido, puede encontrarse en cualquiera de las formas que se indican en la figura 1.

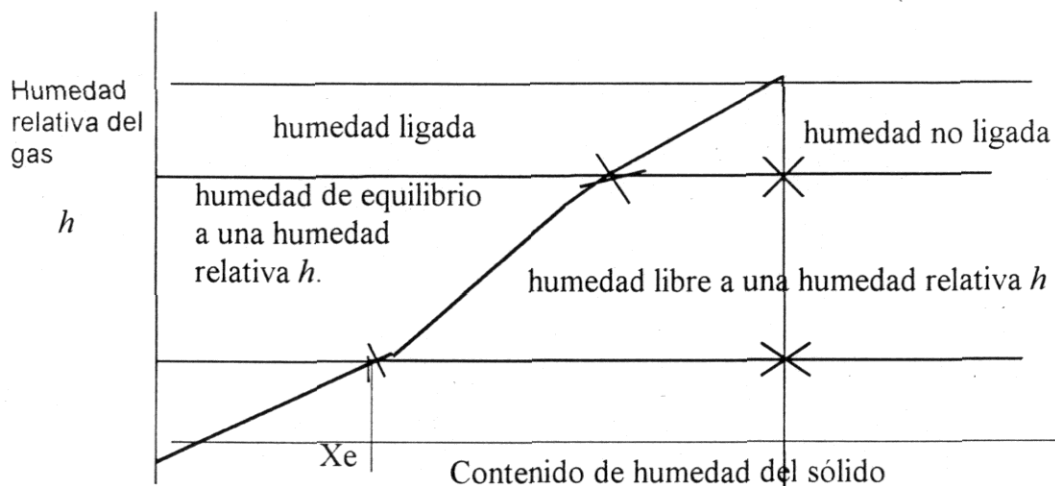


Figura 1 Contenido de humedad

El agua libre es la que es susceptible de ser evaporada del sólido, en tanto que el agua ligada, puede ser difícil de extraer y en este orden, la que es más fácil de eliminar es el agua no ligada (Fellow, 1994)

2.2.7. Mecanismos de secado.- Los mecanismos por los cuales el agua abandona al sólido sometido a un proceso de secado, pueden ser diferentes. Un primer mecanismo es el convectivo, el cuál se da como resultado de una evaporación superficial que es proporcional a la cantidad de calor que llega al sólido. Cuando el agua que se extrae sale del interior del sólido, los mecanismos pueden ser diferentes: capilaridad, difusión de

agua, difusión de vapor, encogimiento del sólido, etc. Evidentemente, estos mecanismos dependen en buena medida de la naturaleza interna del sólido (Geankoplis, 1995; Vizcarra *et al.*, 1998).

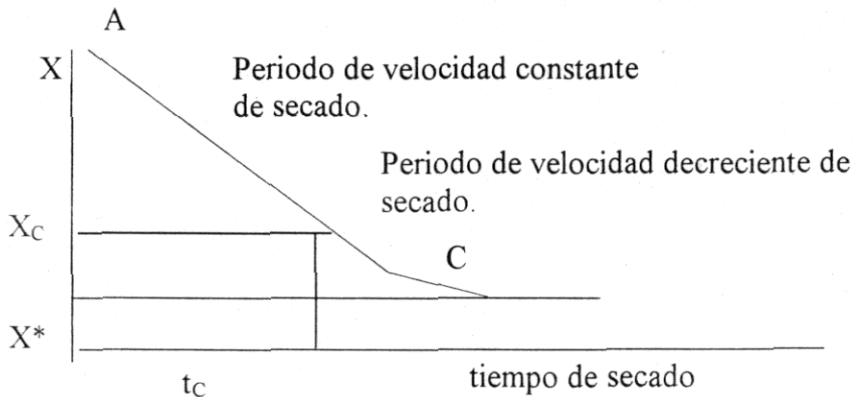
2.2.8. Determinación de humedad.- Para calcular el contenido de humedad en el sólido, en base seca, se puede hacer a partir de la siguiente relación:

$$X = \frac{P_{mh} - P_{m.s.}}{P_{m.s.}} \quad (1)$$

y para referir la cantidad de humedad en el sólido, se puede hacer considerando la base húmeda (x) o la base seca (X). La relación entre ellas es como sigue:

$$x = \frac{X}{1+X} \quad y \quad X = \frac{x}{1-x} \dots\dots(2)$$

2.2.9. Curvas de secado.- Una gráfica en la que se relaciona el contenido de humedad del sólido, base seca (X), en función del tiempo de secado (t), genera la figura 2, que es conocida como la curva de secado de un sólido en particular.



Donde:

- X= Contenido de humedad base seca
- Xc= Humedad crítica del sólido
- X*= Contenido de humedad en equilibrio

Figura 2 Curva de secado de un sólido.

En esta figura, se pueden distinguir, la región comprendida entre los puntos A y B, que es conocida como el periodo de velocidad de secado constante, y que se caracteriza

porque guarda una relación lineal entre X y t ; el punto B, que marca el fin de este periodo, y que se conoce como punto crítico y define un cambio en el mecanismo que controla el secado. Es decir, mientras que en el periodo de velocidad de secado constante, el mecanismo que controla el proceso es la transferencia externa de calor por convección, a partir de este punto, el control del proceso va a estar condicionado a la naturaleza interna del sólido, haciéndose más importante el control interno, mientras más avanza el proceso de secado. La humedad en este punto se conoce como humedad crítica del sólido (X_c). Finalmente, entre el punto B y C, se encuentra la región correspondiente al periodo de velocidad decreciente de secado, la que a su vez se caracteriza porque las pendientes de las tangentes a la curva, decrecen continuamente en toda la región. El proceso de secado aquí representado, termina cuando se llega al contenido de humedad de equilibrio (X^*), el cual se alcanza cuando la presión parcial del agua del gas iguala a la presión de vapor del agua contenida en el sólido. Específicamente, puede haber sólidos que sólo presenten periodo de velocidad constante de secado (gel de sílice, p.e.) o puede haber los que solo presenten periodo de velocidad decreciente de secado, como la mayoría de los granos, entre ellos el trigo. (Earle, 1988; Geankoplis, 1995).

2.2.9.1. Proceso de velocidad constante de secado.- Balances de materia y energía. Cuando el sólido se seca bajo estas condiciones, los balances de materia y energía, se establecen entre la película de aire saturado que rodea a la partícula húmeda y el medio. De esta manera se puede considerar, para efectos prácticos, que la temperatura y la humedad del gas correspondientes a la interfase son, respectivamente, la temperatura de bulbo húmedo y la humedad de saturación. Como la temperatura de la partícula no sufre cambios durante este periodo, el calor transferido por convección (en ausencia de radiación), desde el gas hasta el sólido, es usado para la evaporación y corresponde al calor latente de vaporización del agua que satura la interfase (Geankoplis, 1995; Brennan *et al.*, 1980).

Por lo tanto, se pueden plantear las siguientes ecuaciones para la correspondencia entre los fluxes de calor y masa:

$$q = N_A \lambda_w \dots \dots \dots (3)$$

Balance de energía:

$$q = hA(T_s - T_w) \dots \dots \dots (4)$$

Balance de masa:

$$N_A = k_y A(Y_w - Y_s) \dots \dots \dots (5)$$

Donde:

q= Flux de calor, N_A= Flux de masa (agua que se evapora), λ_w= Calor latente de vaporización
 h= Coeficiente convectivo de transferencia de calor, k_y= Coeficiente convectivo de transferencia de masa, A= Área de transferencia para calor y para masa, T_s= temperatura de saturación,
 T_w= temperatura bulbo húmedo, Y_w= humedad absoluta a condición de saturación, Y_s= Humedad del aire en el secador

2.2.9.2. Proceso de velocidad decreciente de secado.- Balances de materia y energía.

En este periodo, la migración de humedad a la superficie del sólido es insuficiente para mantener saturada la película de aire que rodea al sólido. Bajo estas circunstancias, la rapidez de secado no depende solo de las condiciones en la película, sino además, de la estructura interna del sólido y de los mecanismos de migración de la humedad.

Para el caso de una partícula esférica de radio R y coeficiente de difusión constante, el balance de coraza en un elemento de volumen es:

$$- 4 \pi r^2 D \left. \frac{\partial X}{\partial r} \right|_r + 4 \pi r^2 D \left. \frac{\partial X}{\partial r} \right|_{r + \Delta r} = 4 \pi r^2 \Delta r \frac{\partial X}{\partial t} \dots \dots \dots (6)$$

condición inicial :

$$t = 0 \quad \forall r \quad X = X_0$$

condicione s de frontera :

$$\forall t \quad r = 0 \quad \frac{\partial X}{\partial r} = 0 \dots \dots \dots$$

$$\forall t \quad r = R \quad X = X^*$$

D= coeficiente de difusividad efectiva de la partícula

X= contenido de humedad en el sólido (base seca)

X*=contenido de humedad en equilibrio

X₀=humedad inicial del sólido

r= posición radial

R= radio de la esfera

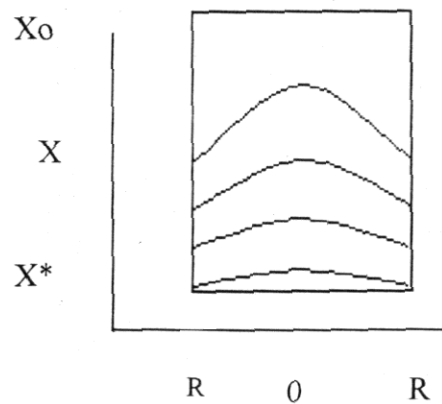
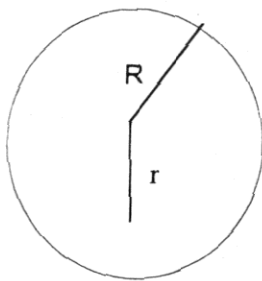
Solución a la ecuación diferencial parcial de segundo orden:

$$\frac{X - X^*}{X_0 - X^*} = \frac{6}{\pi^2} \sum_1^{\infty} \frac{1}{n^2} \text{EXP} \left(- \left(\frac{n\pi}{R} \right)^2 Dt \right) \quad (7)$$

n = termino de la serie

Donde :

$$X = \int_0^R \frac{4\pi r^2 X dr}{(4/3)\pi r^3} \dots\dots\dots(8)$$



R= radio partícula
r= posición radial

Figura 3 Perfiles de humedad dentro de la partícula esférica.

A menudo solo se puede especular acerca de cuál mecanismo de transferencia es el que prevalece para un sólido particular. En la literatura, son dos los mecanismos que más se plantean, el difusivo (gradiente de concentración), tanto para agua líquida como para vapor, y el mecanismo de transferencia por capilaridad (gradiente de presión) (Geankopolis, 1995; Earle, 1988; Brennan *et al.*, 1980; Kunii y Levenspiel, 1991). En el caso del mecanismo de transferencia por difusión, se aplica la segunda ley de Fick, que se establece de acuerdo a la geometría del sólido y se resuelve tomando en cuenta las condiciones inicial y de frontera apropiadas (Earle, 1988). En cuanto a la transferencia de

calor, generalmente se acepta que los gradientes de temperatura en el interior del sólido son despreciables, por lo que se suele resolver exclusivamente el balance de masa (Mujumdar, 1987)

Cuando el término exponencial de la ecuación de difusión, $D\pi^2t/R^2 > 1.2$, se puede aproximar la solución a un solo término de la serie. Esta simplificación es frecuentemente aplicada en el análisis del secado de granos (donde K es la constante que agrupa al coeficiente de difusividad):

$$\frac{X - X^*}{X_0 - X^*} = \frac{6}{\pi^2} \text{EXP}\left(-\left(\frac{\pi}{R}\right)^2 Dt\right) = \frac{6}{\pi^2} \text{EXP}(-Kt) \dots \dots \dots (9)$$

Otra relación muy parecida a esta ecuación y que es similar a la ley de Newton de enfriamiento, también es muy utilizada en el análisis del secado de granos. Esta ecuación supone que la rapidez de pérdida de humedad grano rodeado por un medio a temperatura constante, es proporcional a la diferencia entre la humedad del grano y la de equilibrio:

$$-\frac{dX}{dt} = k(X - X^*) \quad (10)$$

donde: k = constante de velocidad

y que gráficamente corresponde a la representación de la siguiente figura 4:

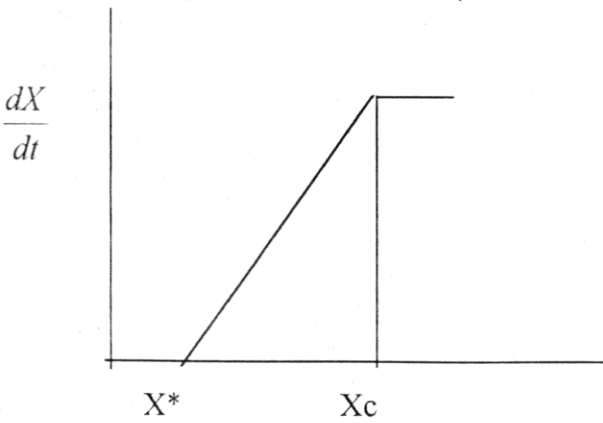


Figura 4. Cinética de secado correspondiente al periodo de velocidad de secado decreciente.

Al integrar esta ecuación considerando que a $t = 0$, $X = X_0$, se llega a la siguiente solución:

$$\frac{X - X^*}{X_0 - X^*} = \text{EXP}(-kt) \dots\dots\dots(11)$$

Esta relación se puede obtener para diferentes temperaturas de operación del secador, por lo que se puede proponer que la constante de proporcionalidad k , varía con la temperatura de acuerdo a la ley de Arrhenius, como sigue:

$$k = k_0 \text{EXP}\left(-\frac{E}{RT}\right) \dots\dots\dots(12)$$

- k = constante de velocidad de secado (t-1)
- k_0 = factor preexponencial (t-1)
- E = energía de activación (kj/kgmol)
- R = constante de los gases (8.314kj/kg mol°k)
- T = temperatura °k

Esta ecuación puede ser linealizada, al relacionar el $\ln k$ vs. $1/T$, para obtener la energía de activación (E) correspondiente la proceso de secado, a partir del valor de la pendiente de la recta, y el valor de k_0 , de la ordenada al origen, tal como se presenta en la siguiente figura 5:

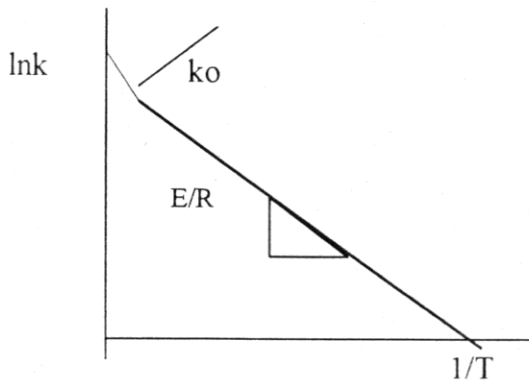


Figura 5 Cálculo de la energía de activación y del factor exponencial.

2.2.10. Secado natural y artificial.- En términos generales, el secado de granos se puede realizar en forma natural o artificial. En el primero, el secado se realiza exponiendo a los granos a la acción directa del sol, en superficies de terreno

relativamente extensas. De esta forma, el sol es la única fuente de energía que evapora el agua del sólido y el aire, es el encargado de transportarla. Aún cuando es una técnica de secado relativamente económica, tiene la seria limitante de que los granos están expuestos a las inclemencias del tiempo y a la acción de roedores, aves, etc., además de recibir los desechos que se hallan flotando en el aire. En México, este procedimiento de secado es aún muy empleado, sobretodo en las comunidades de escasos recursos y limitaciones tecnológicas. En cambio el secado artificial, ofrece una gama muy variada de posibilidades de control del proceso de secado (Chistonsen, 1974).

2.2.11. Equipos de secado.- Por la manera de operar los equipos, los secadores funcionan por lotes o en forma continua. En el caso de los secadores que operan en forma continua, por la forma de poner en contacto a las fases, éstos a su vez se clasifican en flujo a corriente paralela, a contracorriente o corriente cruzada. Y por la forma de transmitir el calor, se denominan, secadores directos o indirectos. Un secador es un equipo donde se lleva a cabo la operación de secado. Constan de un sistema de ventilación que canaliza el aire del ambiente al recinto donde se encuentra el sólido que va a ser deshidratado, pasando primero por una sección de acondicionamiento del mismo, en donde el aire es limpiado, humidificado o deshumidificado y calentado. Para el calentamiento se pueden utilizar diversas fuentes de energía, como la solar, combustión de gas o diesel, calentamiento eléctrico, o por vapor. En el caso del vapor y combustión, el calentamiento puede ser directo o a través de superficies. Después se encuentra la sección de secado, donde se ponen en contacto el aire y el sólido y finalmente, el aire y el sólido son separados. Normalmente, el aire es recirculado y mezclado con cierto volumen de aire fresco (Geankoplis, 1995)

2.2.12. Secador de lecho fluidizado.- Este tipo de secadores han demostrado su gran utilidad y aplicación en los procesos de secado. Indudablemente entre las principales ventajas que aportan estos equipos, es el tratamiento homogéneo al que se someten los sólidos, además de poder implementar operaciones tanto por lotes como continuas. La gran movilidad que tienen los sólidos fluidizados, hace que se favorezca la disipación de calor, lo cual le confiere grandes características térmicas a la operación. Considerando que el fenómeno de secado es una transferencia simultánea de calor y masa, dependiendo del mecanismo que controle el proceso, el lecho puede operar de manera

aceptablemente isotérmica. Así, cuando el proceso es el periodo de secado constante, se puede considerar que la temperatura de operación del lecho, es la temperatura de saturación del aire (bulbo húmedo). En la medida que prevalece el periodo de secado decreciente, la temperatura del lecho evoluciona a la temperatura de alimentación del aire al secador, debido a que el sólido se calienta continuamente hasta alcanzar la temperatura de bulbo seco del aire. Entre las principales desventajas que se asocian al funcionamiento de estos equipos, se pueden señalar, el deterioro mecánico que puede sufrir el sólido, al estar continuamente sometido a interacciones entre los mismos sólidos y con las paredes del recipiente. Si de inicio hay una amplia distribución del tamaño de partícula, la fluidización de estos sólidos no es fácil de alcanzar, ya que las partículas más pequeñas tienden a salir primero mientras que las de mayor tamaño, apenas empiezan a fluidizar o están estáticas. Otra limitación sería que debido a la naturaleza del sólido, éstos no se fluidicen, ya que se aglomeran, o de partida forman grumos, etc. Otra de las desventajas de la operación de los secadores de lecho fluidizado son los altos costos por consumo de energía, debido a las relativamente grandes cantidades de aire que se manejan (Davidson y Harrison, 1971).

2.3. Fluidización

2.3.1. Estudio hidrodinámico.- El estado fluidizado se alcanza cuando una corriente de aire, introducida a un recipiente, normalmente cilíndrico, donde se encuentra confinada una carga de sólidos, es lo suficientemente alta que vence la resistencia inercial de los sólidos en reposo, quedando éstos suspendidos en la misma corriente de aire. El punto de transición entre el estado de reposo absoluto de los sólidos al estado fluidizado, se conoce como el punto de velocidad mínima de fluidización. En el otro extremo, cuando los sólidos empiezan a ser arrastrados fuera del recipiente, se conoce como punto de velocidad terminal (Zahed *et al.*, 1995). Cuando la fluidización de los sólidos es obtenida por medio de un fluido gaseoso, a esta fluidización se le denomina fluidización agregativa y se caracteriza por la presencia de burbujas en el lecho. Si el medio fluidizante es un líquido, entonces se denomina fluidización particulada y se caracteriza por una expansión continua del lecho conforme aumenta el flujo de líquido. El comportamiento hidrodinámico del lecho fluidizado, en el que los sólidos se comportan como un líquido en ebullición le ha conferido características muy peculiares a estos

sistemas, las cuáles han sido ampliamente explotadas en procesos físicos y químicos. Una de las grandes ventajas apoyadas en este comportamiento hidrodinámico de los sólidos fluidizados, es el que se puedan operar estos equipos en forma continua (Dermott y Evans, 1978; Evans, 1983)

2.3.2. Clasificación de los sólidos.- De acuerdo a las propiedades particulares de los sólidos, como lo son la densidad aparente, el tamaño promedio de partícula y esfericidad, éstos pueden clasificarse en diferentes grupos. Grupo A: Son materiales con tamaño de partícula pequeño o baja densidad ($\sim 1.4 \text{ g/cm}^3$). Son aereables y fluidizan fácilmente, producen un burbujeo suave con burbujas pequeñas, un ejemplo típico es el catalizador para reacciones de rompimiento de moléculas. Grupo B: Poseen un tamaño de partícula en el rango: $40 \text{ mm} < dp < 500 \text{ mm}$ y densidad entre 1.4 y 4 g/cm^3 , fluidizan bien, con burbujeo vigoroso y burbujas que tienden a crecer, a este grupo pertenece la arena. Grupo C: A este otro grupo pertenecen los sólidos cohesivos, polvos muy finos, como por ejemplo las harinas que son muy difíciles de fluidizar. Grupo D: Lo constituyen partículas grandes o densas, producen un lecho explosivo, cuando el lecho es profundo y son difícilmente fluidizables, ejemplo de este grupo son los granos. En general los granos y específicamente el trigo, generan en el estado fluidizado, un lecho vigorosamente burbujeante y en ocasiones explosivo (Kunii y Levenspiel, 1991).

ρ_s = densidad sólido

ρ_g = densidad gas

dp = diámetro partícula

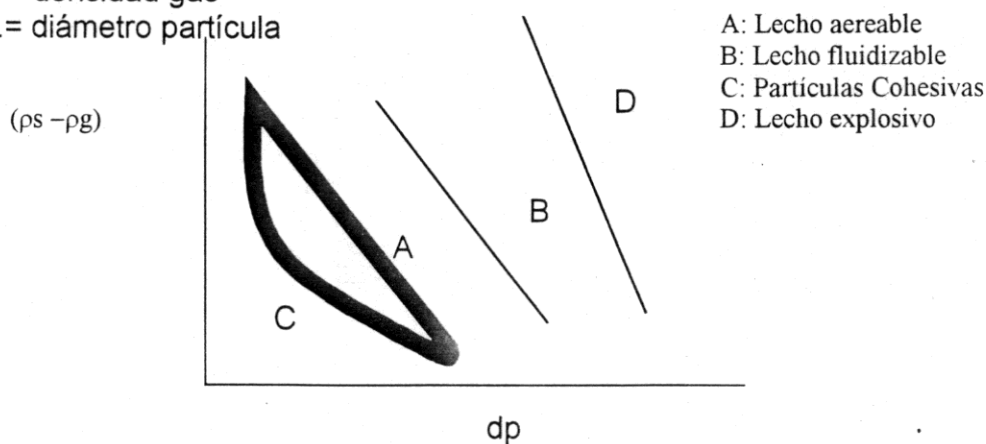


Figura 6 clasificación de sólidos

La clasificación de los sólidos de acuerdo a la metodología establecida por Geldart (1986) considera las características de las partículas que hacen que se fluidicen de una

forma u otra. Estas características se relacionan en una gráfica (figura 6) en escala logarítmica de $(\rho_s - \rho_g)$ vs. dp .

2.3.3. Mapeo del régimen de fluidización. De acuerdo a un estudio realizado por Grace (Kunii y Levenspiel, 1991), las características del lecho fluidizado se pueden conocer al relacionar la velocidad de fluidización normalizada (u^*) y el tamaño de partícula normalizada (dp^*) como se muestra en la figura 7. En general los granos y específicamente el trigo, generan en el estado fluidizado, un lecho vigorosamente burbujeante y en ocasiones explosivo. La velocidad terminal es la velocidad a partir de la cuál las partículas sólidas empiezan a ser arrastradas fuera de recipiente. Esta velocidad marca el límite del estado fluidizado de las partículas y empieza el régimen de transporte neumático (Kunii y Levenspiel, 1991)

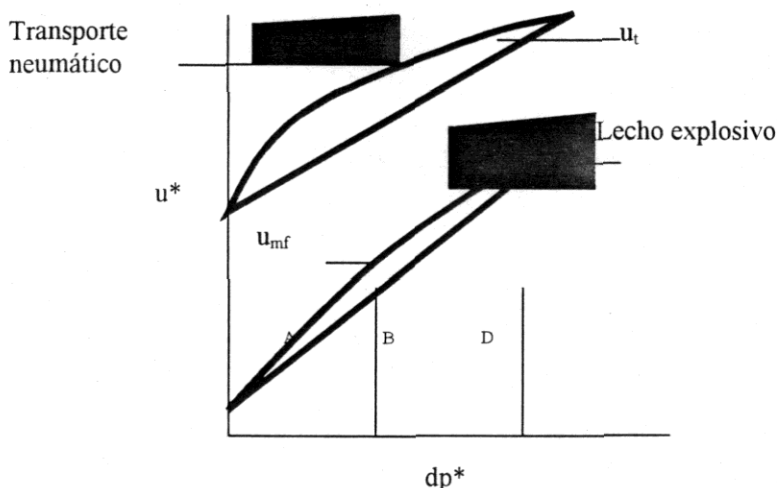


Figura 7. Mapeo de los regímenes de fluidización.

Estas cantidades se pueden calcular a partir de las siguientes ecuaciones:

$$dp^* = dp \left[\frac{\delta_s(\delta_s - \delta_g)g}{\mu} \right]^{1/3} \dots\dots\dots(13)$$

dp^* = tamaño de partícula normalizado

$$u^* = u \left[\frac{\delta_g}{\mu(\delta_s - \delta_g)g} \right]^{1/3} \dots\dots\dots(14)$$

- u^* = velocidad de fluidización normalizada
- δ_s =densidad sólido
- δ_g =densidad gas
- γ =aceleración de la gravedad
- μ =viscosidad gas

2.4. Calidad física química reológica y de panificación del trigo y su harina

2.4.1. Criterio de calidad industrial del trigo.- La calidad del trigo varía para el agricultor, para el almacenador, así como para los molineros y panaderos. Se puede decir que la calidad es el conjunto de características o atributos que diferencian las unidades individuales de un producto y que tiene importancia al determinar el grado de aceptabilidad por el consumidor. La calidad del trigo en general se refiere al alto rendimiento que se obtiene en una cosecha con buena calidad comercial, tanto para el mercado como para la industria, así como una buena calidad nutricional de acuerdo con el potencial propio del cereal cultivado. Generalmente el grano debe ser incólume, grano con color normal, (no descolorido) y con brillo, que no haya sufrido la intemperie, estar libre de enfermedades micóticas o bacterianas, no germinado, no debe haber sufrido lesión mecánica por la trilla, por insectos o por roedores y no haber sufrido ningún daño por el proceso térmico de secado (Serna, 1996). Estar apto para el almacenamiento, la humedad no debe pasar de 14% si se ha de molturar inmediatamente, ni de 12% si ha de almacenarse. Por lo tanto el proceso de comercialización del trigo requiere de criterios de calidad medibles mediante la aplicación de metodologías estandarizadas de acuerdo a su calidad física, molinera, harinera, reológica y de producto final de panadería, para determinar la calidad del trigo así como la del que fue sometido a tratamientos tales como el de secado (Pomeranz, 1988).

2.4.2. Calidad Física de los granos

2.4.2.1. Tamaño y forma.- El trigo tiene forma ovoide con extremos redondeados en ambos extremos. Los granos miden de 4 a 10 mm de largo la experiencia ha demostrado que trigos de tamaño medio (8mm) de forma redonda generalmente tienen altos rendimientos harineros. Los grupos que tienden a la esfericidad, contienen menos salvado que los alargados y la uniformidad en tamaño es importante.

2.4.2.2. Peso de 1000 granos.- Es un indicador del tamaño del grano relacionado con el rendimiento molinero. Los granos uniformes contienen mayor endospermo. Es una característica que depende principalmente del tamaño y de la densidad. El peso de 1000 granos de las variedades Mexicanas varía de 32 a 40 g siendo los valores menores para los trigos suaves del grupo IV y los mayores para los de gluten fuerte, grupo I y los cristalinos grupo V.

2.4.2.3. Peso hectolítrico (o volumétrico).- Es uno de los criterios más comunes en la medición de la densidad del grano que en general se relaciona con el rendimiento del cultivo. El peso hectolítrico se relaciona con la densidad real del grano con la textura del endospermo o con el contenido de proteína y estado de salud característico de cada variedad, forma, tamaño, humedad, impurezas y uniformidad de los granos. Los granos dañados tienen peso hectolítrico bajo mientras que los granos con textura vítrea o con mayor contenido de proteína tienen mayor densidad aparente. La unidad que se usa para esta variable es kilogramos por hectolitro kg/hl (es el peso de cien litros de grano de trigo). Se considera que los trigos de mayor peso por unidad se muelen con más facilidad y rinden más harina (Kent, 1987). Los lotes de grano con mayor humedad tienen un menor peso hectolítrico (Serna, 1996). Su valor oscila entre 84 kg/hl para el caso de trigos de gluten fuerte y 78 en trigos de gluten débil.

2.4.2.4. Densidad relativa.- Los valores de densidad son importantes y están relacionados con la condición del grano y con los rendimientos de molienda. Los granos más densos tienen menos probabilidad de estar dañados con insectos y mejores posibilidades de soportar el manejo durante su almacenamiento y comercialización. Están relacionados con el uso final del trigo. La densidad del grano es expresada en g/cm^3

2.4.2.5. Índice de dureza.- Esta prueba determina la textura o dureza del grano. Es una característica varietal esencialmente, aunque ejercen sobre esta propiedad del grano cierta influencia los factores ambientales. El grado de dureza se cree depende de la interacción entre los gránulos de almidón y la matriz proteínica en el endospermo del grano, así como de los contenidos proteínicos. Los granos de aspecto vítreo y duro generalmente son de alto contenido de proteína y producen harinas de textura granular gruesas, arenosas, que permiten producir pan leudado con facilidad. Los trigos de aspecto suave harinoso son más apropiados para la producción de pasteles y galletas. La dureza del grano se estima frecuentemente en forma visual. Esta observación es muy imprecisa por lo que se han desarrollado métodos de escarificación y molienda que permiten mayor precisión y un dato numérico. Conociendo la dureza del grano es posible realizar el acondicionamiento o adecuación de humedad del grano para la molienda y cernidos. Durante el perlado los trigos suaves pierden más peso, en tanto que los duros

pierden menos peso por lo tanto los valores bajos en índice de dureza corresponden a trigos duros en tanto que los valores altos a trigos suaves (ANDSA, 1978).

2.4.3. Calidad química de granos y harinas

2.4.3.1. Humedad.- Es uno de los criterios más comunes para determinar la calidad del grano. La prueba da una indicación de la cantidad de materia seca que el comprador está obteniendo y es importante para determinar el manejo del grano. En la norma oficial mexicana para la comercialización del trigo se establece como límite de humedad el 13% ya que con humedades superiores a 14%, el grano es mas propenso a deteriorarse y requiere de aereación y secado.

Tabla 9 Conceptos de calidad en trigos (pruebas físicas y químicas)

Concepto	análisis físicos	concepto	análisis químicos
Tamaño	mediano o grande (7, 8 y 9 mm)	Cenizas	Entre 0.5-0.6%
Forma	Redonda	proteína	mayor de 8%
Aristas	regular o buena (7 y 8 mm)	sedimentación	mayor que 32cc (gluten intermedio a fuerte)
Dureza	Menor de 60%	-----	-----
Peso hectolítrico	Mayor que 69/kg/hl	-----	-----
peso de 1000granos	Mayor de 30 g		

Fuente: Carbajal y Castillol., (1977); Iruegas, (1975); Rodríguez y Salazar., (1980)

Los método más empleados para determinar la humedad es por medio de la estufa y por conductividad eléctrica con el equipo Motomco.

2.4.3.2. Cenizas.- Esto no es más que un parámetro que nos indica el grado de pureza de las harinas obtenidas durante la molienda. Mientras más bajo es el valor de cenizas, más satisfactoria la calidad de harina y de molienda (Pomeranz, 1988). Valores sobre 0.5% en las harinas obtenidas puede ser indicio de un mal acondicionado o mal manejo de la muestra en los diferentes pasajes del molino, lo que trae por consecuencia harinas de segunda clase.

2.4.3.3. Proteína total y determinación gluten.- El contenido proteínico de una harina determina el comportamiento de ésta durante la panificación. Este parámetro está relacionado con el volumen del pan y la capacidad de absorción de agua por parte de la harina. La cantidad de proteína cruda está relacionada con el nitrógeno orgánico total de los cereales. El contenido proteico se estima multiplicando la cantidad de nitrógeno por

un factor de conversión de nitrógeno a proteína de 5.83 en grano y de 5.7 en harinas. Para la determinación de la cantidad de proteína se utiliza el método Kjeldahl, así como el fisicoquímico de reflectancia infrarrojo. Aunque las técnicas más comúnmente usadas para medir proteína en disolución se basa en técnicas espectrofotométricas. Por otro lado el análisis de gluten determina en corto tiempo la cantidad aproximada de proteína en trigo y la fuerza de gluten que tienen los diferentes tipos de trigo. Los valores de rendimiento de gluten en la muestra original son utilizados como criterio de selección, clasificación y calidad de harina de trigo (Salazar, 1989; NOM-F-7-1982). El gluten se puede aislar de una masa de harina, lavándola al chorro de agua o con una disolución diluida de sal (NaCl) eliminando la mayor parte de almidón y sustancias hidrosolubles:

2.4.3.4. Rendimiento molinero.- El rendimiento de molienda o porcentaje de extracción se puede obtener después de pesar los productos y subproductos obtenidos del molino experimental. Los factores que más afectan el rendimiento de molienda son los relacionados con la condición del grano. Para que un grano sea sometido a molturación, requiere de un acondicionamiento previo que está determinado por la humedad y dureza de las muestras. Consiste en aumentar el contenido de humedad del grano en un periodo de tiempo para dejar penetrar el agua y mejorar su estado físico para la molienda.

2.4.4. Propiedades físicas o reológicas de las masas de trigo.- Estas pruebas permiten predecir el comportamiento del trigo (ó harina) en determinada etapa del procesamiento durante el mezclado, fresado, división, moldeado y horneado. Estas propiedades se derivan directamente del contenido y calidad de proteínas de la harina y determinan la calidad del producto final (Pomeranz, 1988).

2.4.4.1. Farinógrafo de Brabender.- Mide y grafica la resistencia que opone la masa al mezclado (esfuerzo mecánico). Se calculan los parámetros de absorción de agua, el tiempo óptimo de amasado, estabilidad e índice de tolerancia. De éstos un alto valor de absorción indica incremento en los rendimientos en panadería. Por medio de las curvas se clasifican a la las harinas con diferente fuerza de gluten de débiles a fuertes. En una harina fuerte el tiempo de desarrollo puede ser notablemente largo relacionado con la alta calidad del gluten o también con la velocidad de absorción de agua.

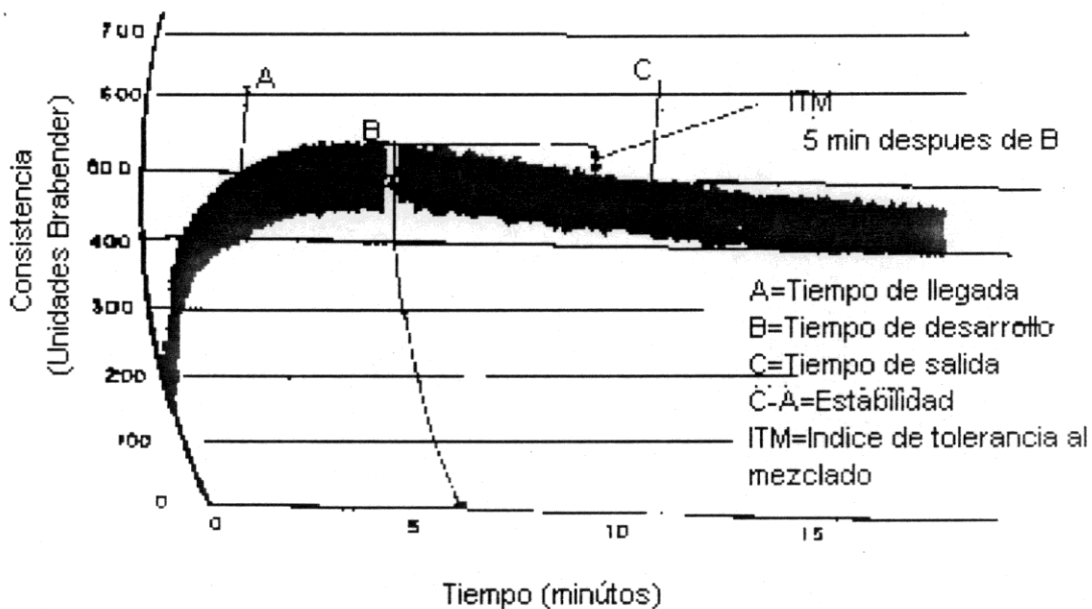


Figura 8 Esquema de farinograma típico

La estabilidad así como el índice de tolerancia al mezclado son parámetros importantes en la industria de la panificación ya que dan idea de la calidad de la masa. La industria panadera prefiere harinas con alta absorción de agua, tiempo promedio de mezclado y buena estabilidad (Serna, 1996).

2.4.4.2. Extensógrafo de Brabender.- Mide masas leudadas en condiciones que simulan la fermentación en el proceso de panificación. Los índices de mayor utilidad medidos en el extensógrafo son: a) La resistencia R es decir, la altura del extensograma medida en unidades Brabender. correspondientes al punto de base situado a 5 cm de distancia del comienzo de la curva. b) La resistencia R1 que es la altura máxima de la curva. c) Extensibilidad E, que corresponde a la longitud de la base desde el comienzo al final del extensograma expresado en mm. La relación R/E que se obtiene dividiendo la resistencia por la extensibilidad si esta relación es grande la masa será poco extensible. Los mejores trigos tienen una relación igual a 1 es decir la resistencia y la extensibilidad tienen el mismo valor. El área bajo la curva, determinado con el planímetro, es el trabajo realizado por el instrumento para romper la masa y da una indicación de la fuerza de la misma.

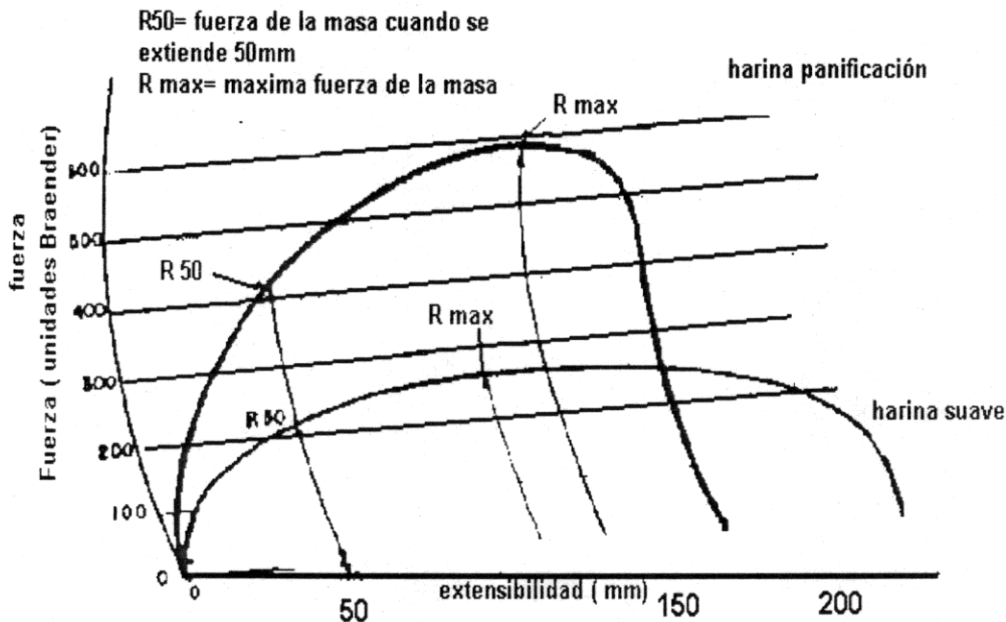


Figura 9 Esquema de un extensograma típico

2.4.4.3. Alveografo de Chopin.- Mide la resistencia de la masa al estiramiento y la extensibilidad. El alveógrafo de Chopin clasifica los trigos mexicanos por su calidad de gluten. Por medio del gráfico se pueden seleccionar trigos harineros de gluten fuerte, intermedio, débil y bien balanceado. La curva típica muestra dos principales valores, la tenacidad, altura máxima de la curva (T) y la extensibilidad de la masa, representada por la longitud de la curva (E). La altura máxima de la curva y su longitud son utilizadas como medidas de la resistencia contra la deformación (tenacidad) y la extensibilidad. El alveograma muestra una elevada correlación con el contenido proteico de la harina, es mayor el contenido proteico cuanto mayor es la altura de la curva. Además la extensibilidad de la masa está en correlación con el volumen del pan y una harina bien balanceada en resistencia a la deformación (P) y extensibilidad (E) produce un pan con un máximo de volumen y con una estructura interna bien proporcionada. La relación de tenacidad a extensibilidad (T/E) permite estimar el balance de estas características de la masa. Cuando la relación $T/E=1$ varía de 0.85 a 1.15 se dice que la masa es balanceada. El área bajo la curva nos da una idea de la fuerza del gluten, a mayor área mayor fuerza general (W). Por medio del valor W los trigos se clasifican en tres

categorías: 1.- Superiores de 300×10^{-4} J; gluten fuerte, 2.- Medios 200 a 300×10^{-4} J; gluten medio fuerte, 3.- Menos 200×10^{-4} J; gluten débil. La relación entre tenacidad y el coeficiente de expansión. P/G clasifica las características del alveograma en balanceado, extensible y tenaz. Valores de P/G mayores de 5 es indicativo de tenacidad de las masas relacionado con mala calidad de panificación

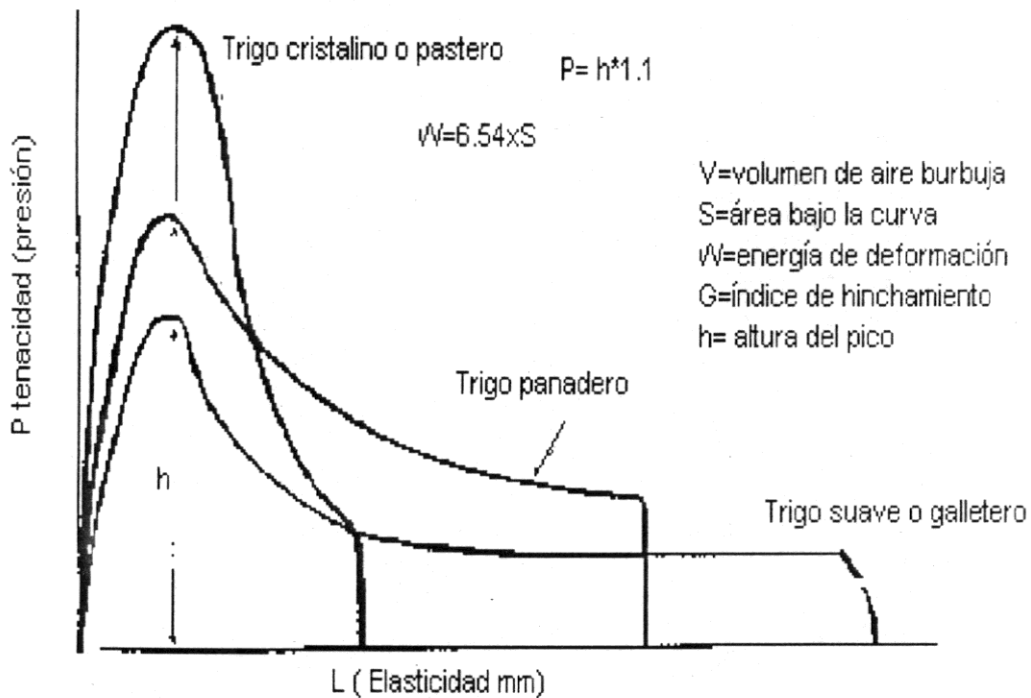


Figura 10 Esquema típico de un alveograma

2.4.4.4. Mixógrafo de Swanson.- El mixógrafo mide y registra la resistencia de una mezcla de harina y agua al ser mecánicamente amasada y solo requiere de 10 a 35 g de muestra. La curva obtenida indica un punto mayor de consistencia denominado tiempo de desarrollo, en el cual la masa posee la mayor fuerza o mejores propiedades reológicas esta curva indica la absorción de agua, tiempo y tolerancia de mezclado. Harinas con tiempos de amasado en el mixógrafo de entre 2-4 min son las más aceptables en la industria. La absorción de agua y el peso de la muestra están en función del contenido proteico y humedad de la harina, respectivamente.

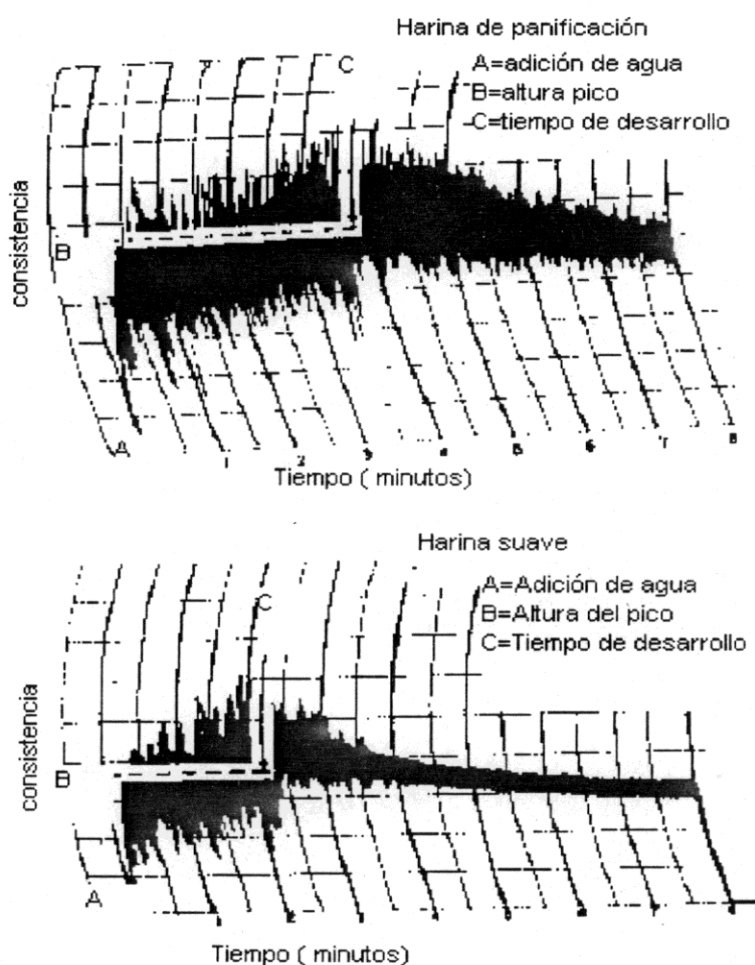


Figura 11 Esquema típico de un extensograma

2.4.4.5. Pruebas de panificación.- Esta prueba evalúa los parámetros que integran la calidad de las harinas. El proceso de panificación se realiza siguiendo diferentes métodos tales como el de masa directa. En este ensayo las harinas se mezclan con levadura, azúcar, sal y agua mezclando hasta desarrollar apropiadamente el gluten. Posteriormente la masa se sujeta a diferentes etapas de fermentación, moldeado y horneado. La tabla 10 muestra parámetros de calidad de panificación. En el pan se mide el volumen, y características internas y externas (color, textura de la miga y características de la corteza). Se ha reportado que una de las pruebas más fiables para determinar la calidad de los trigos es la prueba de panificación dando condiciones de la verdadera capacidad de la harina para retener gas y producir un pan de calidad (Hoseney, 1986).

Tabla 10 Conceptos de calidad reológica, molinera y panadera del trigo

Calidad	Conceptos	Valores
Reológica	Alveograma	W entre 100-400 erg/cm ²
	mixograma	tipo de gluten medio fuerte, fuerte y débil T/L=0.89-0.99 balanceado forma 4-8
Molinera	rendimiento	igual o mayor que 70%
Panadera	volumen de pan	mayor que 750cc
	color de miga	cercano a blanco
	textura de miga	muy buena

W=área bajo la curva en el alveograma, indica la fuerza del gluten, T/L= índice de elasticidad

Fuente: Carbajal y Castillo., (1977); Iruegas, (1975);Rodríguez y Salazar., (1980)

2.4.4.6. Electroforesis.- La electroforesis en geles de poliacrilamida bajo condiciones disociantes ha sido ampliamente utilizada para conocer el número de subunidades de las proteínas del gluten y el peso molecular de sus cadenas polipeptídicas, usando un agente reductor de enlaces disulfuro (2-mercaptoetanol) y otro en su ausencia. La técnica electroforética requiere que la mezcla de proteínas sea desnaturalizada por calentamiento a 100°C en la presencia de SDS y el agente reductor, bajo estas condiciones los complejos polipéptidos SDS cargados negativamente, con densidad de carga idéntica pueden emigrar en un gel y su separación es realizada únicamente de acuerdo al tamaño del polipéptido (Laemmli, 1970; Bietz y Wall, 1972; Bunce *et al.*, 1985). El fundamento de separación de esta técnica, se basa en el movimiento proteico a través de un medio eléctricamente conductivo, en respuesta a una aplicación de voltaje, las proteínas y los péptidos son anfóteros que poseen grupos ionizables tanto aniónicos como catiónicos y su carga neta y movilidad están en función del pH del medio que los rodea. Una proteína en solución, a un pH diferente a su punto isoeléctrico puede tener tanto carga positiva como negativa, ocasionando movilidad a través de un campo eléctrico. Las moléculas con carga positiva emigran hacia el cátodo mientras que aquellas con carga negativa lo hacen hacia el ánodo. Además del pH, la fuerza iónica y la conductividad del medio son otros factores importantes, que influyen en la movilidad de las moléculas durante el desarrollo del proceso electroforético, por eso es importante que se mantengan constantes estos parámetros. En este caso el pH en el cual se efectúa la separación no es un margen de pH muy amplio. El sistema disociante SDS y el agente reductor 2 mercaptoetanol rompen la estructura cuaternaria, terciaria y secundaria de las proteínas. La cadena polipeptídica se desenrolla y se rodea por las

moléculas de SDS y se forma una micela. Las numerosas cargas negativas que provee las moléculas de SDS hacen que la carga que llevan las proteínas se vuelvan insignificantes. Por lo tanto la cadena polipeptídica se transforma en una micela elongada cuya longitud y carga son proporcionales al peso molecular de la cadena. Con respecto a las proteínas del gluten de trigo sometido a proceso térmico diversos estudios bioquímicos basadas en técnicas electroforéticas han demostrado que el daño por calor del trigo esta asociado con las propiedades físicas y químicas de las proteínas del gluten y en particular de la fracción glutenina (Booth *et al.*, 1980; Lupano, 1987). Preston *et al.* 1989 determinaron que la fracción glutenina resulta ser la proteína del gluten más sensible al tratamiento térmico.

3. JUSTIFICACIÓN

Actualmente nuestro país se ha convertido en un alto consumidor de productos derivados del trigo, teniendo por lo tanto que aumentar la producción y control de calidad de este grano. El trigo generalmente se cosecha con humedad menor del 14%, pero en condiciones especiales de cosecha húmeda, puede alcanzar humedades de hasta 40%, por lo que tendrá que someterse al secado artificial, para evitar riesgos en el almacenamiento. El secado artificial es la forma más eficiente de secar grandes volúmenes de granos, consiste en principio contar con un depósito para los granos, con un soporte con perforaciones que permita el paso del aire, de un ventilador que induzca una corriente de aire y de una fuente de calor para calentar el aire. El secado con aire caliente permite secar las 24 hrs del día, sin embargo debe hacerse con cuidado evitando sobre secar las capas inferiores de los lotes de granos, evitar fisuras en los granos por cambios de temperatura drásticos y de dañar su calidad panadera debido a altas temperaturas. El secado en lecho fluidizado proporciona bajos contenidos de humedad en el grano en tiempos cortos existiendo un buen contacto entre el sólido y el gas en el lecho fluidizado. Al mezclarse el sólido y el aire bajo la fluidización se asegura una homogeneización del tratamiento térmico del trigo con un buen control de temperatura y por lo tanto de la calidad del grano. Aunque el secado depende principalmente de la temperatura factores tales como el tiempo, la variedad del trigo y su contenido de humedad deben ser considerados. La calidad del trigo y sus harinas depende de las características intrínsecas de sus proteínas, determinadas por la variedad (genotipo), el contenido de la proteína determinan las propiedades reológicas y panaderas de las variedades del trigo (Chacón, 197; Bushuk, 1982). El contenido de proteína depende de factores agronómicos y ambientales, existen variaciones significativas en el total de proteína y fracciones proteicas en el endospermo de las diversas variedades de trigo con diferente potencial panificable, a mayor contenido de proteína en una variedad de trigo, el volumen de pan por unidad de proteína se incrementa (Orth y Bushuk, 1972). Sin embargo dos variedades diferentes con el mismo contenido de proteína pueden producir pan con diferente volumen, estas diferencias se les denomina calidad y está relacionado con las propiedades intrínsecas de las proteínas

del gluten, Pomeranz 1988 y Hosney *et al.* 1971 señalaron que la calidad del gluten puede ser afectada por condiciones adversas tales como la temperaturas de secado. Con la finalidad de estudiar el comportamiento del trigo en el proceso de secado, en este trabajo se seleccionó la variedad Oasis de textura dura, gluten fuerte y proteína total del 9% y la Salamanca de textura suave, gluten débil y proteína total del 8%, ambas variedades usadas comúnmente en la industria de la panificación. Por otro lado para determinar la calidad industrial del grano que fue sometido a tratamiento térmico de secado generalmente se han usado los métodos aplicados para determinar la calidad del trigo. Sin embargo actualmente se ha propuesto que es importante seleccionar pruebas sensibles que detecten adecuadamente cambios físicos y químicos del trigo que fue sometido a tratamiento térmico de secado.

4. METODOLOGÍA

4.1. Materiales y Métodos

4.1.1. Variedades de trigo.- Se trabajó con dos variedades de trigo (*Triticum aestivum*) de uso comercial, ambas cosechadas durante el ciclo agrícola otoño-invierno 1996-97. La variedad Salamanca S75, que es un trigo suave de gluten débil, de la región del Bajío, Guanajuato y la otra, denominada Oasis F89, que es un trigo duro de gluten fuerte, de la región del Valle del Fuerte Sinaloa.

4.1.2. Toma de muestra.- Se tomaron cinco muestras parciales de 10 kg de lotes de cada variedad de trigo, transportado en camiones, para completar una muestra total de 50 kg del grano. Asegurándose con los productores que los trigos no hubieran sufrido ningún tratamiento térmico previo de secado con aire caliente. Posteriormente las muestras se homogeneizaron y se dividieron por cuarteo hasta obtener muestras representativas de 1 kg (ANDSA, 1978). El grano de ambas variedades de trigo se recibió con una humedad inicial menor del 14%.

4.1.3. Limpieza del trigo.- Se llevó a cabo de manera manual y utilizando un juego de tamices, a fin de separar esencialmente piedras, paja, granos rotos e inmaduros y otras semillas.

4.1.4. Trigo control.- Se usó como control, trigo para ambas variedades con humedades menores al 14%, que no fue acondicionado ni sometido a proceso de secado previo.

4.1.5. Porcentaje de humedad del grano.- A ambas variedades de trigo, limpias de materia extraña, se les determinó el contenido de humedad en estufa a 130°C por 2 horas; (método 44-15 AACC 1986) registrando la pérdida de peso.

4.1.6. Acondicionamiento del trigo.- Debido a que prácticamente las muestras de trigo estaban libres de materiales extraños y con un contenido promedio de humedad entre el 11 y 13% b.h. se planteó la necesidad de acondicionar previamente el trigo que iba a ser procesado en el estudio llevándolo a los contenidos de humedad requeridos por la experimentación. Para que las muestras de trigo alcanzaran un determinado contenido de humedad, a una carga de trigo específica colocada en un recipiente se le agregó la cantidad de agua necesaria y se dejó reposar durante 24 horas, con agitación aproximadamente cada 8 h para homogeneizar la muestra. La cantidad de agua

necesaria por unidad de masa seca de trigo se adicionó de acuerdo a un balance de masa según

$$M_{SS} (X - X_0) = A \dots\dots\dots(15)$$

Conociendo el contenido inicial de humedad (x_0) y fijando el contenido de humedad final al que se quiere llevar al trigo (x) se puede calcular la cantidad de agua que es necesario agregar.

4.1.7. Equipo experimental de secado en lecho fluidizado.- En la figura 12 se presenta el diagrama de la instalación experimental. El secador consiste en un tubo de acrílico de 0.1 m de diámetro por 0.6 m de longitud. En la parte inferior del tubo se encuentra el plato distribuidor que es una placa de aluminio perforada de 0.003 m de espesor con agujeros de 0.0015 m y distancia entre agujeros de 0.005 m en arreglo triangular. Justo por encima del distribuidor, se encuentra conectado un manómetro en "U" con agua. En la parte superior del tubo se encuentra una celda por la que se hace pasar el aire y donde se encuentran dos termómetros en serie que proporcionan respectivamente las temperaturas de bulbo seco y húmedo. En la misma figura se pueden apreciar otras partes de la instalación, como la sección de acondicionamiento y control del flujo de aire, que consiste en una trampa de impurezas y un regulador de presión que permite amortiguar las fluctuaciones de presión inducidas por el compresor.

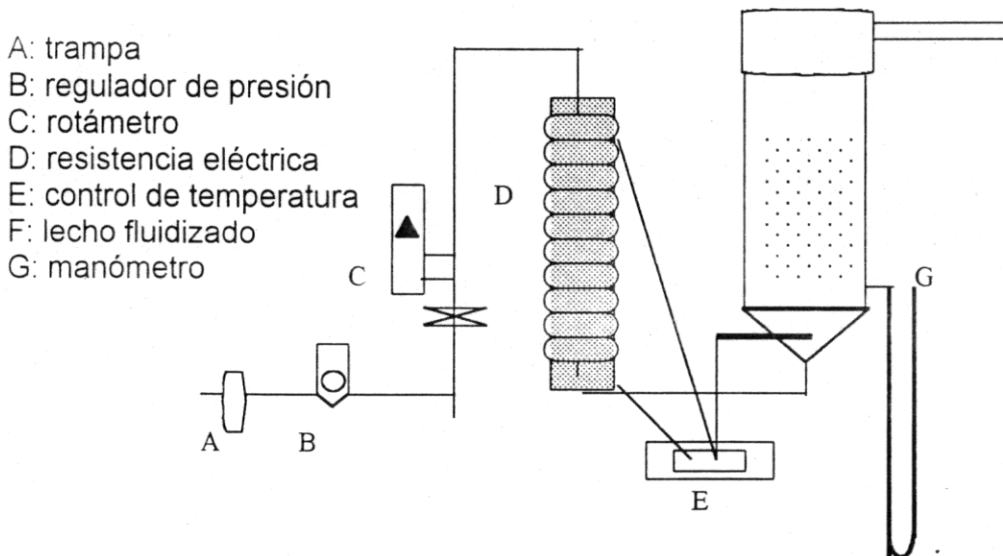


Figura 12.- Equipo experimental de secado en lecho fluidizado

El rotámetro permite medir flujos de aire de hasta 0.015 m³/s a condiciones estándar. Posteriormente se encuentra una sección de calentamiento de aire, que consiste en un banco de resistencias eléctricas tipo abrazadera, conectadas en serie, que suministran un total de 2 kW de potencia eléctrica y están controladas por un regulador digital. Este sistema permite calentar y mantener constante la temperatura de alimentación del aire al secador, por medio de un termopar instalado en la parte inferior del plato distribuidor que manda la señal al regulador.

4.1.8. Caracterización física del trigo para el secado por lecho fluidizado.

4.1.8.1. Diámetro equivalente.- Con un vernier se miden las longitudes características del grano, según se muestra en la figura 13.

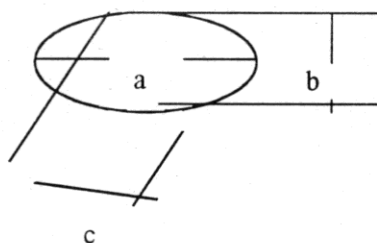


Figura 13.- Dimensiones del grano de trigo

Se calcula el volumen correspondiente y éste a su vez se iguala al volumen de una esfera (Kunii y Levenspiel, 1991)

$$V_s = \frac{\pi}{6} d_s^3 \dots\dots\dots(16)$$

4.1.8.2. Diámetro promedio.-Este experimento se realiza por medio de un juego de tamices (malla 4 a 20). Una muestra de trigo de aproximadamente 0.15 kg, se carga al juego de tamices apilados desde el de mayor abertura (malla 4) hasta el de menor tamaño (malla 20). Por espacio de 10 minutos el conjunto de tamices se somete al efecto de vibración, movimiento rotatorio y trepidatorio, con el fin de hacer que la muestra se distribuya entre los tamices. Al final, se pesan las cantidades retenidas en cada tamiz y se aplica la siguiente fórmula:

$$d_p = \left(\sum_{i=1}^n \frac{x_i}{d_i} \right)^{-1} \dots\dots\dots(17)$$

donde x_i representa la fracción en peso de trigo retenido en el tamiz i y d_i representa el diámetro promedio correspondiente a las aberturas del tamiz superior y la del tamiz, esta prueba se realizó por triplicado (Tosi *et al.*, 1988; Mendoza y col., 1985)

4.1.8.3. Esfericidad.- Este parámetro mide que tan lejos de la geometría esférica se encuentra el sólido. Para realizar el cálculo se requiere aplicar la siguiente fórmula, a volumen de sólido constante (Kunii y Levenspiel, 1991):

$$\phi_s = \left(\frac{\text{superficie de la esfera}}{\text{superficie de la partícula}} \right) \text{-----} (18)$$

4.1.8.4. Densidades empacada y aparente.- Considerando un volumen de referencia (probeta de 250 ml), se introduce el trigo hasta llenarlo completamente. La densidad empacada se calcula, dividiendo la masa de sólidos introducida, entre el volumen de referencia. Para el cálculo de la densidad aparente, se toma el mismo experimento anterior y con ayuda de una bureta, se mide la cantidad de líquido que se puede introducir, cuidando de no rebasar el límite del volumen de referencia. Entonces, la masa de sólidos se divide por el volumen de la probeta corregido por el volumen de líquido introducido (Tosi *et al.*, 1988; Aragón y Ocaña, 1988; Mendoza y col., 1985)

4.1.8.5. Fracción vacía de empaque.- Una manera de calcular la fracción de espacios vacíos del empaque, es aplicando la siguiente fórmula que relaciona los inversos de las densidades empacada y aparente del sólido:

$$\varepsilon_e = \frac{\rho_e^{-1} - \rho_a^{-1}}{\rho_e^{-1}} \dots\dots\dots(19)$$

También se puede aprovechar el volumen de líquido introducido en el empaque, del experimento realizado para determinar la densidad aparente, dividiéndolo entre el volumen de referencia (Tosi *et al.*, 1988; Aragón y Ocaña, 1988; Mendoza y col., 1985)

4.1.9. Cinética de secado.- Al equipo vacío se le hace pasar más corriente de aire con un mínimo de humedad (contenido de humedad absoluta de 0.008 kg de H₂O/kg de aire seco) fijando el gasto volumétrico a 1 atm de presión y 0,01214 m³/s que corresponde a una velocidad superficial de 1.54 m/s, manteniéndose constante durante todo el tiempo que duró la corrida. Se midió la temperatura de bulbo seco y húmedo, para así determinar las condiciones de humedad del aire de entrada. La temperatura de entrada de aire se mantuvo constante por medio de un controlador de temperatura regulado por un sistema automático digital Chromalox 3910 11208 rango de 0-500°C tipo J. La temperatura del lecho se midió por medio de termopares, conectados a un registrador (Blue M., Electric. Cop. Illinois, E.U). Posteriormente se fueron midiendo continuamente, la temperatura de entrada, la temperatura en el centro del lecho y la temperatura de bulbo seco y húmedo a la salida del secador. Una vez alcanzadas las condiciones de operación estables (10 min aproximadamente) en el gasto y temperatura de entrada de aire de secado, el equipo se cargó con 1 kg de muestra de trigo húmedo. Cada corrida para cada variedad humedad y temperatura se realizó por duplicado. Durante el proceso de secado se tomaron muestras por triplicado de entre 1 y 2g en frascos puestos previamente a peso constante, a partir del tiempo cero y durante cada 10 min por cada tiempo establecido, según el bloque experimental. La determinación de la pérdida de humedad de los granos se calculó en base seca midiendo la pérdida de humedad de los granos por diferencia de peso secando a 110°C en estufa por 24 h.

4.1.9.1. Ecuación de Arrhenius.- Considerando que la cinética de secado varía linealmente con el contenido de humedad del sólido, de acuerdo al modelo propuesto en la ecuación 11, se puede calcular el valor de k a cada temperatura de operación del secador. Posteriormente, si se propone una dependencia experimental de la k con la temperatura de acuerdo al modelo de Arrhenius, ecuación 13, se puede calcular la energía de activación del proceso, al graficar lnk vs 1/T°K.

4.1.10. Determinaciones físicas de calidad del grano

4.1.10.1. Porcentaje de humedad del grano.- Determinado en estufa a 130°C (método 44-19 AACC, 1986)

4.1.10.2. Peso hectolítrico.- Se determinó el peso por unidad de volumen en kg/hl. Se realizó con una balanza de precisión (Cobos modelo, BOE 65-59, E.U.) que consta

básicamente de un recipiente de un litro de capacidad. Se realizó según el método 55-10 (AACC, 1986)

4.1.10.3. Peso de 1000 granos.- Se pesaron 200 granos libres de impurezas. El valor se multiplica por 5 para obtener el resultado por 1000 granos de cereal

4.1.10.4. Dureza del grano.- La dureza del grano se determinó con un perlador de cebada (tipo Scott Strong modelo 1710 E.U) cuyo principio básico es la resistencia del material a una acción abrasiva medida en un tiempo. Se midió la cantidad de material desprendido de una muestra de 20 g durante un minuto (método 55-20 AACC, 1986)

4.1.10.5. Rendimiento molinero.- Muestras de trigo tanto secado como sin secar se acondicionaron hasta contenidos de humedad de aproximadamente 15-16%h (b.h.). Los trigos se colocaron en recipientes y se dejaron en reposo por 24 h con agitación ocasional. La molienda del trigo se realizó en un molino de laboratorio (Quadrumat Senior Mill, C.W. Brabender Inc., South Hackensack, NJ., E.U.). La harina obtenida se pasó por un tamiz de malla No 10 XX. Se determinó el rendimiento molinero (método 26-20 AACC, 1986)

4.1.11. Pruebas química de calidad de las harinas

4.1.11.1. Humedad.- Las muestras se colocarán dentro de la estufa a 130°C por espacio de 2 h (método 44-15 AACC, 1986)

4.1.11.2. Cenizas.- Esta prueba se realizó por incineración en la mufla a una temperatura de 550°C hasta completa ignición según método 08-11 de AACC (1986)

4.1.11.3. Porcentaje de proteína total.- La determinación de proteína cruda se realizó por el método de micro-Kjeldhal (método 46-10 y 11a AACC, 1986), la digestión de la muestra se llevo a cabo por hidrólisis ácida y fijándose el nitrógeno orgánico como sulfato de amonio que es el que se destila y determinándose por titulación con ácido valorado la cantidad de nitrógeno en la muestra. El porcentaje de proteína se calculó con el factor de NX5.7.

4.1.11.4. Sedimentación.- Método 56-61 de la AACC (1986), el valor de sedimentación es una medida indirecta de la fuerza del gluten ya que el procedimiento precipita las gliadinas y gluteninas, proteínas responsables de esta característica. A menor sedimentación más débil será el gluten y viceversa.

4.1.11.5. Gluten.- El contenido de gluten húmedo se realizó por lavado de acuerdo al método 38-11, AACCC (1986) usando un Glutomatic (Falling number, Sweden).

4.1.11.6. Proteína soluble en NaCl (método de Bradford).- La prueba para la determinación de la pérdida de solubilidad de las proteínas en solución salina se basa en la prueba de Bradford usando el reactivo colorido azul de Coomassie G-250 (Bradford, 1976). Usando suero de albúmina bovina como estándar. La solución estándar fue preparada bajo las mismas condiciones de las muestras. El reactivo de azul brillante de Coomassie G250 Sigma, se preparó disolviendo 100 mg de el colorante en 50 ml de etanol al 95% adicionando 100 ml de ácido fosfórico al 85% (p/v). La solución fue diluida para obtener un volumen final de 1litro. La concentración final en el reactivo fue de 0.01%(w/v) de azul brillante de Coomasie, 4.7% (w/v) de etanol y 8.5% (w/v) de ácido fosfórico. También se preparó solución de NaCl 2% (peso/volumen). La preparación de proteína patrón se elaboró pesando 25 mg de BSA (albúmina sérica bovina Sigma) y disolviéndola en 100 ml de agua destilada. El tratamiento de las muestras se llevó a cabo pesando 0.1 g de harina en tubos de 12 x 100mm y adicionando 5 ml de solución de NaCl al 2%. Los tubos se agitaron durante un minuto y se dejaron reposar durante una hora. Posteriormente se tomaron 100 μ l del sobrenadante a los que se les adicionó 1 ml de reactivo de Bradford y se leyó la absorbancia en un espectómetro (Spectronic Génesis, 5 EU) a 595nm las lecturas se efectuaron después de 5 minutos (y dentro de la primera hora) contra un tubo testigo, las muestras se prepararon por triplicado (Ghaly et al., 1973).

4.1.12. Características físicas de la masa de trigo.- Las determinaciones viscoelásticas de la masa se llevaron a cabo utilizando el farinógrafo y extensógrafo de Brabender, así como el alveógrafo de Chopin y el mixógrafo de Swanson.

4.1.12.1. Farinógrafo.- El Farinógrafo de Brabender se usó para determinar absorción de agua la consistencia adecuada a 500 U.B. y la estabilidad de la masa según el método 54-21 AACC (1986)

4.1.12.2. Extensógrafo.- La prueba se desarrolló de acuerdo al método 54-10 de la AACC (1986). Con los extensogramas obtenidos se determinó la altura del extensograma después de 50 mm del inicio (resistencia después de 50 mm), máxima

altura del extensograma (máxima resistencia) longitud de la curva (extensibilidad), área bajo la curva dando una indicación aproximada de la fuerza de la masa

4.1.12.3. Alveógrafo de Chopin.- Las características físicas de las masas, obtenidas a partir de las harinas de los trigos se midieron empleando el alveógrafo de Chopin (Chopin, S.A., Tripette y Renaud, Villeneuve la Garenne Francia modelo MA82) por el método 54-30 AACC, (1986). Los parámetros medidos fueron; La extensibilidad (L) ó capacidad de la masa para ser estirada antes de romperse se estima por la longitud de la base de la curva en mm. La resistencia que opone la masa a la extensión (T) se determina en las ordenadas de la curva y se designa como tenacidad (medida en mm X 1.1). Por lo que la relación T/L proporciona una medida de la estabilidad de la masa. La fuerza de la masa (W) en ergs se determina midiendo el área encerrada por la curva y expresa el trabajo para estirar la masa.

4.1.12.4. Mixógrafo de Swanson.- Con el mixógrafo de Swanson (National Manufacturing Co., Lincoln, Nebraska, E.U) se llevó a cabo el mezclado de 10 g de harina y agua (66% absorción, 14 % harina base húmeda) durante un tiempo de 6 min método 54-40 (AACC, 1986). Por medio de la curva mixográfica se determinó el tiempo óptimo de amasado y la fuerza del gluten la cual se evaluó de acuerdo a la forma mixográfica de la curva obtenida y tomando como testigo la del trigo que no se sometió a proceso de secado

4.1.12.5. Prueba de Panificación. Finalmente se elaboró pan por el método directo de panificación 10-10 (AACC, 1986). El método de panificación se llevó a cabo en una sola fase mezclando; harina (14% humedad), con 2% de levadura seca, 6.5% de azúcar, 3.5% de manteca vegetal, 1.5% de sal, 0.5% de malta y agua en cantidad variable dependiendo de la fuerza de la harina, en la amasadora hasta desarrollar apropiadamente el gluten. Posteriormente la masa se sujetó a etapas de fermentación con sus consecutivas operaciones de desgasado a diferentes tiempos, posteriormente las masa se moldearon y hornearon. Al pan se le midió el volumen por desplazamiento de semillas de nabo y las características internas y externas, usando una escala y teniendo como referencia pan que fue elaborado con trigo que no fue sometido a proceso de secado.

4.1.13. Prueba de electroforesis.- La electroforesis en gel de poliacrilamida con SDS (PAGE), se realizó de acuerdo a Laemmli a través de un sistema de amortiguador discontinuo (Laemmli 1970, Laemmli y Favre 1973) con una concentración de acrilamida del 10%. Se utilizó un equipo de electroforesis, mini-protean II Slab Cell (Bio-Rad laboratories, 2000 A.N. D., Hercules, CA 94547) minigeles de (11x8.5cm). Las condiciones de corrida fueron de 200 volts constante, durante aproximadamente 45 min. Extracción de proteína.- 0.1 mg de proteína se adicionó a un tubo de centrifuga (30 ml de capacidad). La proteína se extrajo con 2% de dodecil sulfato de sodio (SDS)-0.1M tris-HCL, pH8 (Bottomley *et al.*, 1982) relación de solvente-harina de 25:1. La muestra se dejo por un período de 24 h con agitación ocasional. Posteriormente las muestras fueron centrifugadas a 17,000xg por 1h y 10 min a temperaturas de 0 y 5°C. Los sobrenadantes fueron almacenados en congelación para ser tratados posteriormente (Lupano y Añon, 1987). El estándar fue preparado bajo las mismas condiciones de las muestras. El estándar de proteínas usado para peso molecular fueron de la marca Sigma (MWSDS 70 kit con rango de 14,000-66,000). La muestra del estándar de proteínas se tomo de un vial (Dalton mark VI vial con 13.5 mg de mezcla de proteínas liofilizadas y azul de bromofenol) conteniendo las siguientes proteínas:1) Lisozima (de clara de huevo) 14,300, 2) β lactoglobulina (de leche bovina) subunidades 18,400, 3) tripsinógeno (pancreas bovino PMSF tratada) 24,000, 4) pepsina (mucosa de estomago porcina) 34,700, 5) albúmina de huevo (ovoalbúmina) 45,000, 6) albúmina (plasma bovino) 66,000.

4.1.13.1. Preparación de reactivos.- Las proporciones de las soluciones para la preparación de los géles y amortiguadores de la cámara se dan a continuación:

-Acrilamida al 30% y bisacrilamida al 0.8% (solución 9). Para preparar 50 ml se pesaron 15 g de acrilamida con 0.4g de N,N'-metil-bis acrilamida aforando a 50 ml con agua desionizada, se almacenó a 4°C

-Buffer de gel de corrimiento (Buffer 11) (1.5mM Tris-Cl pH 8.8). Se pesaron 9.084g de Trizma-base (tris hidroximetil-aminometano) y se disolvieron en agua desionizada, se llevó a pH 8.8 con HCl concentrado y se aforó a 50 ml.

-Buffer del tanque (0.025 M tris-base pH 8.3 0.192 M glicina, 0.1% SDS).- Se pesan 3g de Tris con 14.4g de glicina y 10 ml de SDS al 10%. Aforados a 1l con agua desionizada.

-Buffer de empaquetamiento, Trizma -base (solución 15) .- Se pesaron 3g de Trizma base aforando a 50 ml, ajustando el pH a 6.8 con HCl

-SDS al 10% (solución 13).- Se pesaron 5g de SDS (SDS, dodecilsulfato de sodio) y se aforo a 50 ml con agua desionizada.

-Persulfato de amonio (10%).- Se pesaron 0.1 g de persulfato de amonio y se agregaron 1ml de agua destilada (preparar al momento de realizar la determinación)

Tratamiento desnaturizante.- Preparación del buffer para la muestra y estándares.- Se mezclaron 2.5 ml Tris (solución 15), con 4 ml SDS (solución 13) y se agregaron 2 ml de glicerol, *1 ml del reactivo 2 mercaptoetanol (*según tratamiento desnaturizante o no con y sin adición), 0.25 ml de azul de bromofenol al 1% y 10 ml de agua desionizada. Se ajusta a pH 6.8 y se afora. La solución puede ser almacenada hasta un mes en frascos color ámbar y a 4°C.

Montaje de la muestra en el gel.- Se colocaron en tubos ependorf 400 µl del sobrenadante que se obtuvo al haberse solubilizado las proteínas tratadas, se adicionaron 100 µl de la solución 14 (tratamiento de desnaturización) buffer (0.125M tris-Cl pH 6.8, 4% SDS 20% glicerol, 1.0% 2-mercaptoetanol). Se colocaron los tubos en agua en ebullición por 5 minutos. Se dejaron enfriar a temperatura ambiente. Se agregaron 15 µl en cada uno en los canales que contiene el gel. Tanto las muestras como los marcadores de peso molecular fueron aplicados en cada uno de los carriles del gel. Se dio el mismo tratamiento al marcador e identificando en el gel cada una de las posiciones de las muestras.

Preparación de los geles.- Gel de separación al 10% (pH 8.8).- 15 ml de disolución de gel separador al 10%. - Se mezclaron, 5.02 ml de monómero (solución 9), 3.76 ml de buffer 11, 0.15ml de sol SDS, 6.05 ml de agua, 32.8 µl de persulfato de amonio, 5.3 µl de TEMED. Gel concentrador y separador (o de empaquetamiento).- Para formar gel concentrador se mezcló 3.31 ml de monómero (solución 9), buffer de empaquetamiento (solución 15) 6.23 ml, solución de SDS 0.25ml, agua 15.20 ml, persulfato de amonio 124.62µl (realizar en fresco y justo antes de aplicar al gel que es el catalizador), TEMED 12.4µl (volumen total de 24.99ml)

Teñido y desteñido de los geles.- Solución teñidora, se mezclaron 1.25mg de azul de Coomassie R-25 con 92 ml de ácido acético glacial y se aforaron con solución de

metanol al 50% hasta un volumen final de 1l. Al terminar la corrida, los geles se fijaron y se tiñeron por 30 min en la solución teñidora. Este tiempo fue incrementandose conforme las veces que se utilizó esta solución.

-Solución decolorante.- 225 ml de ácido acético glacial, más 150 ml de etanol y se aforó a 3 litros con agua desionizada. Después de teñir los geles, estos se destiñeron en la solución decolorante por 24 h a temperatura ambiente. Se colocaron los geles en un cristalizador con suficiente solución teñidora (azul de Coomassie R-250) por una hora se eliminó el exceso de colorante y se colocaron en otro recipiente conteniendo solución decolorante hasta cubrir por completo el gel. Esta última operación se realizó cambiando 2 veces la solución. Finalmente se adicionó agua destilada al gel y se dejó por 24 h. Los geles se leyeron en un Gel doc 2000 y con el software Quantity one. El sistema usa luz blanca y ultravioleta como fuente de iluminación.

5. Diseño experimental

5.1. Proceso de secado y calidad industrial del trigo.- El trabajo experimental completo sobre el tratamiento térmico de secado se desarrollo de acuerdo a tres experimentos.

5.1.1. Primer experimento.- La primera experimentación consistió en acondicionar (adicionando agua) las dos variedades de trigo a una humedad inicial del 22% (b.s) y someterlas a proceso de secado, aplicando diferentes temperaturas (40, 60, 80 y 100°C) durante una hora en todos los casos. Cada prueba se efectuó por duplicado. Se establecieron las curvas de secado de los trigos tomando muestras de sólidos a intervalos de tiempo de 10 min (por triplicado) y se evaluó el contenido de humedad de las mismas. Para el análisis estadístico se estableció un modelo factorial, realizando la determinación de varianza (ANOVA) y comparaciones múltiples de medias (prueba de Tukey). A los trigos obtenidos del primer bloque experimental se les realizaron: 1) Determinaciones físicas del grano: Peso hectolítrico, peso de 1000 granos, índice de dureza, 2) Pruebas químicas de las harinas: Porcentaje de humedad, cenizas, proteína total, determinación de gluten seco, prueba de sedimentación. 3) Pruebas reológicas de las masas de trigo, determinadas con el farinógrafo el extensógrafo de Brabender, con el alveógrafo de Chopin y con el mixógrafo de Swanson. 4) Elaboración de pan (volumen de la hogaza). El análisis estadístico se llevó a cabo usando un diseño factorial completamente al azar. Se realizaron tres repeticiones para cada tratamiento. De las muestras iniciales de ambas variedades de trigo se tomaron al azar 10 unidades experimentales de un kilogramo cada una, que consistieron en dos controles uno para cada variedad (Oasis y Salamanca) y ocho de dos niveles para cada variedad de trigo y cuatro temperaturas (40, 60, 80 y 100°C) secando por una hora en todos los casos, hasta alcanzar humedades finales del grano dependiendo de la temperatura de secado. Las variables de respuesta medidas fueron las determinaciones hechas al grano y sus harinas. A los resultados se les realizó análisis de varianza y comparación múltiple de medias (prueba de Tukey) usando un paquete estadístico SAS (Statistical Analysis System, SAS, 1990)

5.1.2 Segundo experimento.- El trigo de ambas variedades se acondicionó a tres diferentes contenidos de humedad inicial (17, 25 y 35%), los granos se secaron a 40,60,

80 y 100°C por una hora en todos los casos. Se determinaron las curvas de secado y las energías de activación según Arrhenius. El análisis estadístico incluyó; dos niveles para la variedad (Oasis y Salamanca), cuatro para la temperatura (40, 60, 80 y 100°C) tres niveles para la humedad inicial del grano (17, 25, y 35% hi) y tiempo de secado de una hora. Las pruebas se realizaron por duplicado obteniéndose 48 unidades experimentales de un kilogramo de trigo (24 de la variedad Oasis y 24 de la variedad Salamanca). Para determinar la pérdida de humedad (b.s.) a cada kilogramo de cada variedad de trigo (unidad experimental), se le fue tomando cada 10 min (a partir de un tiempo 0 hasta 60 min) por triplicado, muestras de aproximadamente 2g de trigo. Con el análisis de varianza, se estimó la variación de la pérdida de humedad del trigo, tomando en cuenta las interacciones de los tratamientos; variedad, temperatura y contenido de humedad inicial del grano, contra el tiempo. Junto con el análisis de varianza, se realizó un análisis descriptivo de medias, para determinar las características de las curvas de secado, de las dos variedades de trigo, (Montgomery, 1991; SAS, 1990). Al final del secado, al grano restante se le realizaron pruebas 1) Físicas al grano; Peso hectolítrico y dureza, 2) Químicas a las harinas; % proteína y % de sedimentación, 3) Reológicas a las masas; extensibilidad, tenacidad y fuerza de la masa medidas con alveógrafo Chopin y tiempo de mezclado medido con mixógrafo Swanson y 4) finalmente volumen de la hogaza. Se estableció el análisis estadístico de varianza (prueba de Tukey)

5.1.3. Tercer experimento.- Para esta experimentación el trigo de ambas variedades se acondicionó hasta alcanzar humedades finales del 15 y 20% base seca, respectivamente y se sometieron a secado a temperatura de 40, 60, 70, 80 y 100°C. El tiempo de secado para cada experimento fue diferente según las temperaturas hasta que el grano alcanzó la humedad de equilibrio (de entre 8 y 12%). Las curvas de secado correspondientes de las dos variedades de trigo a los diferentes tiempos y temperaturas, se realizaron tomando muestras de trigo por triplicado cada 10 min durante los primeros 60 min y posteriormente cada 30 min hasta que el grano alcanzó la humedad de equilibrio. Se determinaron las energías de activación y el análisis estadístico de varianza (ANOVA), y comparación múltiple de medias usando prueba de Tukey (SAS, 1990). A los granos secados se les realizaron pruebas 1) Físicas de los granos: Peso hectolítrico y dureza, 2) Químicas de las harinas, % humedad, y solubilidad de proteína 3) Reológicas de las

secados se les realizaron pruebas 1) Físicas de los granos: Peso hectolítrico y dureza, 2) Químicas de las harinas, % humedad, y solubilidad de proteína 3) Reológicas de las masas; Tiempo de mezclado, medido con mixógrafo Swanson y 4) Determinación del volumen del pan.. Finalmente al gluten de las harinas obtenidas en este ultimo bloque se les realizó una prueba de electroforesis. Para cada grupo de variables se realizó análisis de varianza (ANOVA), comparaciones múltiples de medias usando la prueba de Tukey. Los análisis univariados y multivariados se realizaron con el programa estadístico (SAS, 1990).

Tabla 11 Diseño experimental cinética de secado de trigo
Bloques experimentales

<i>Variables</i>	<i>Primero</i>		<i>Segundo</i>		<i>Tercero</i>	
	<i>Niveles</i>	<i>Valores</i>	<i>Niveles</i>	<i>Valores</i>	<i>Niveles</i>	<i>Valores</i>
Variedad	2	Oasis Salamanca	2	Oasis Salamanca	2	Oasis Salamanca
temperatura	4	40,60,80, 100	4	40,60,80,100	5	40,60,70,80, 100
%Hi	1	22	3	17,25,35	2	15,18
Tiempo	7	0,10,20,30,40 50,60	7	0.10,20,30,40, 50,60	diversos	según temperatura

Tabla 12 Diseño experimental calidad de trigo secado
Bloques experimentales

<i>Variables</i>	<i>Primero</i>		<i>Segundo</i>		<i>Tercero</i>	
	<i>Niveles</i>	<i>Valores</i>	<i>Niveles</i>	<i>Valores</i>	<i>Niveles</i>	<i>Valores</i>
variedad	2	Oasis Salamanca	2	Oasis Salamanca	2	Oasis Salamanca
temperatura	4	40,60,80, 100	4	40,60,80,100	5	40,60,70,80 100
%Hi	1	22	3	17,25,35	2	15,18

DIAGRAMA BLOQUES

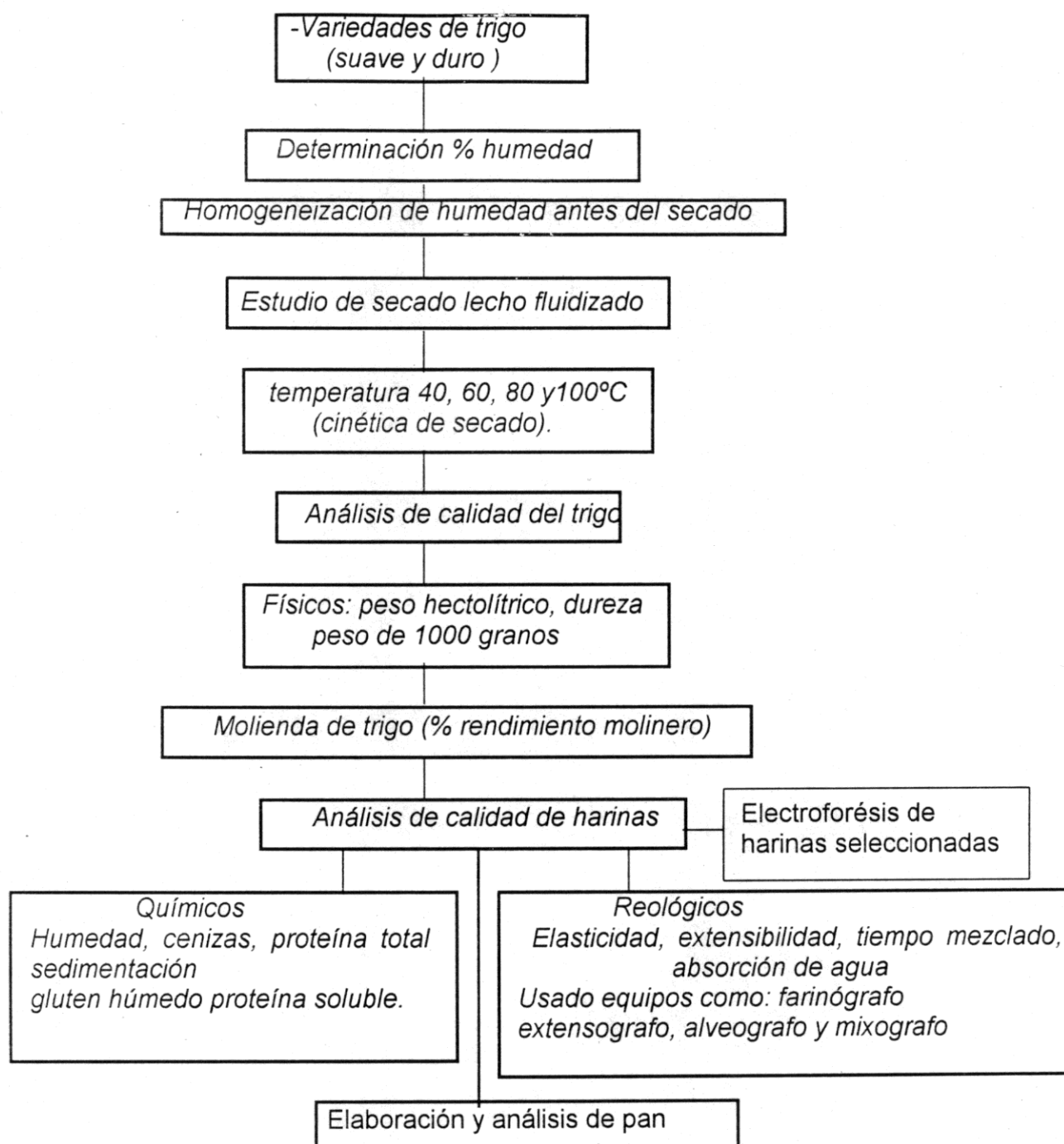


Figura 14 Metodología general

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. Secado de trigo por lecho fluidizado

6.1.1. Caracterización física e hidrodinámica del trigo. La tabla 13 indica las propiedades físicas determinadas a cada variedad de trigo.

Tabla 13 Propiedades físicas del trigo

Variedad	dp(m)	φ_s (-)	δ_e (kg/m ³)	δ_a (kg/m ³)
Oasis	0.004	0.83	794	1323
Salamanca	0.0038	0.80	774	1315

dp(m) = diámetro partícula en m, φ_s (-) = esfericidad, δ_e (kg/m³) = densidad empacada, δ_a (kg/m³) = densidad aparente

Las características hidrodinámicas se consideraron igual para ambas variedades de trigo como se muestra en la tabla 14

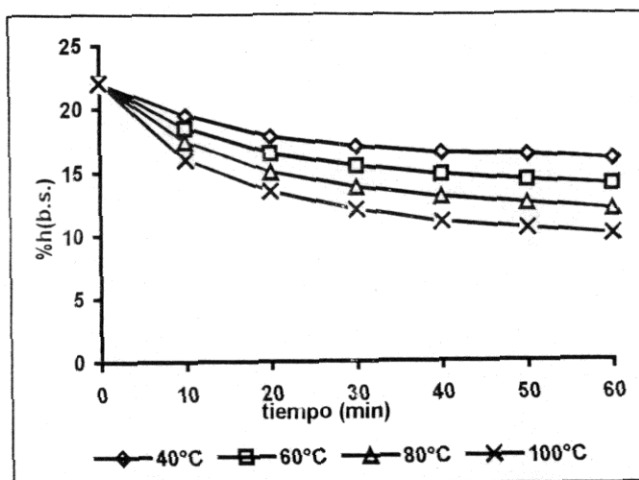
Tabla 14 Valores hidrodinámicos del trigo

ε_{mf} (-)	L_{mf} (m)	U_{mf} (m/s)	U_f (m/s)	U_t (m/s)
0.45	0.10	1.3	1.5	7.68

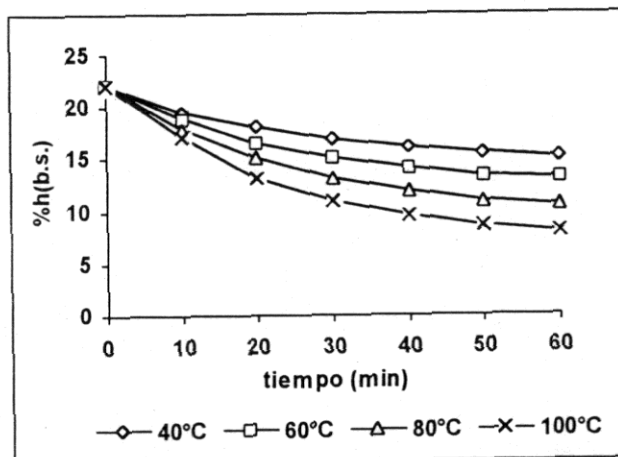
ε_{mf} (-) = fracción de vacío, L_{mf} (-) = altura del lecho, U_{mf} = velocidad mínima de fluidización, U_f = velocidad fluidización, U_t = velocidad terminal de fluidización

Clasificación del sólido y mapeo del régimen de fluidización con ayuda de la ecuación (13) y (14) y la gráfica (figura 7) se concluye que el trigo puede ser considerado un sólido de tipo D y que produce un lecho fluidizado eruptivo (clasificación de Geldat) (Kunii y Levesnspiel, 1991)

6.1.2. Cinética de secado. - En las tablas del apéndice (1) se presentan los valores experimentales de secado obtenidos en función del tiempo y las mediciones de temperatura, medidas a la salida del secador así como la temperatura del lecho fluidizado. Las figuras 15, 16 y 17 del primer segundo y tercer bloque muestran las curvas de secado obtenidas para las diferentes variedades de trigo, Oasis de textura dura y gluten fuerte y Salamanca de textura suave y gluten débil, con contenidos de humedad inicial, temperaturas y tiempos de secado diferentes.

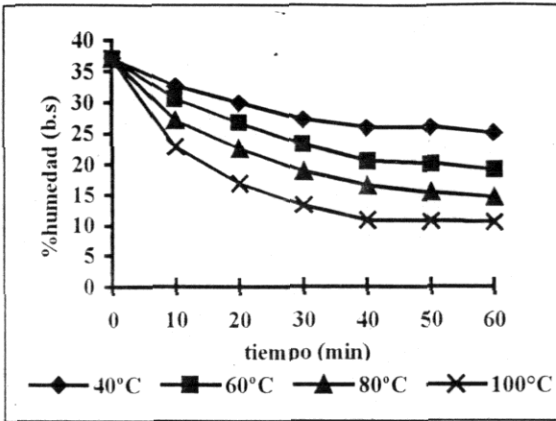


curva de secado trigo variedad Oasis
22% humedad inicial

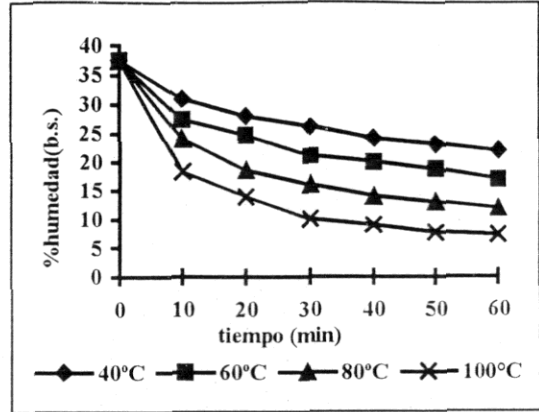


curva de secado trigo variedad salamanca
22% humedad inicial

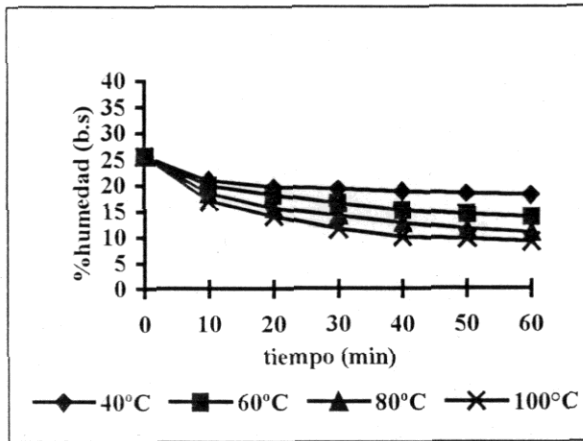
Figura 15 Curvas de secado primer bloque experimental



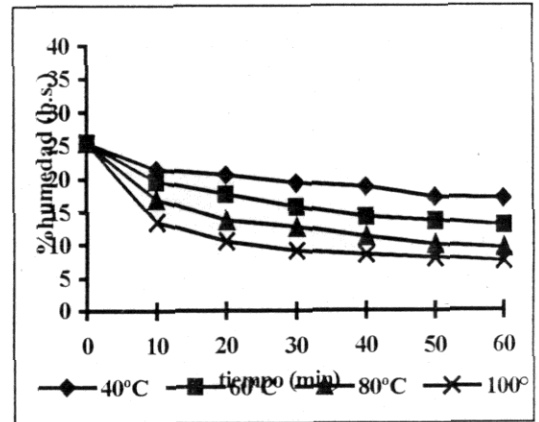
Cinética de secado de trigo variedad Oasis 35% humedad inicial



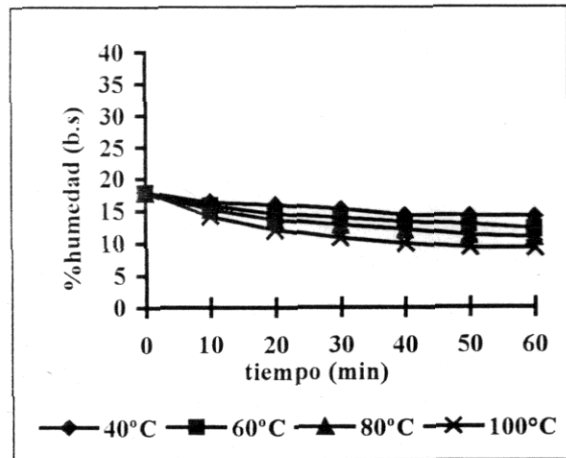
Cinética de secado trigo variedad Salamanca 35% humedad inicial



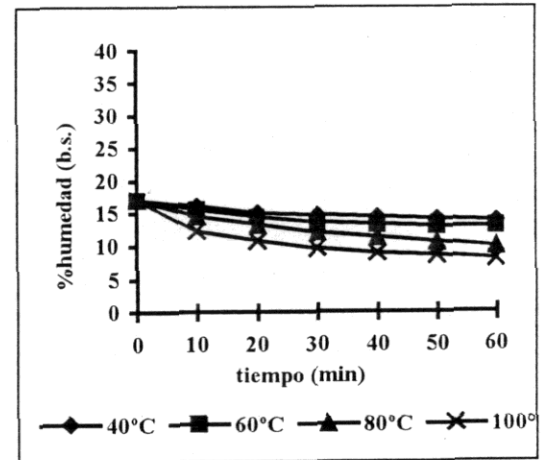
Cinética de secado de trigo variedad Oasis 25% humedad inicial



Cinética de secado trigo variedad Salamanca 25% humedad inicial

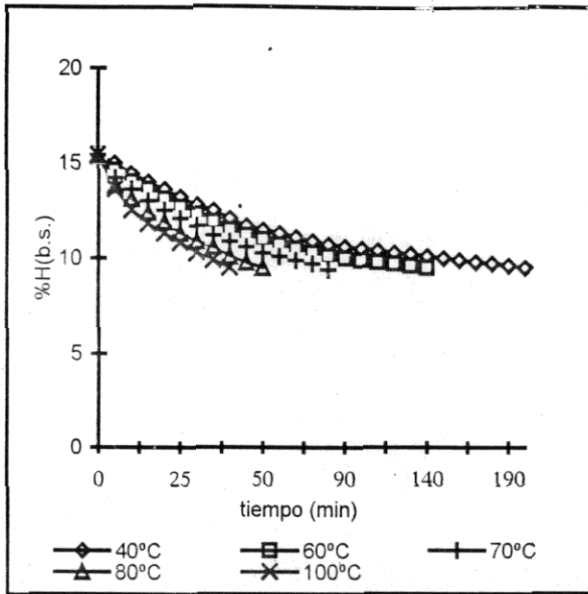


Cinética de secado de trigo variedad oasis 17% humedad inicial

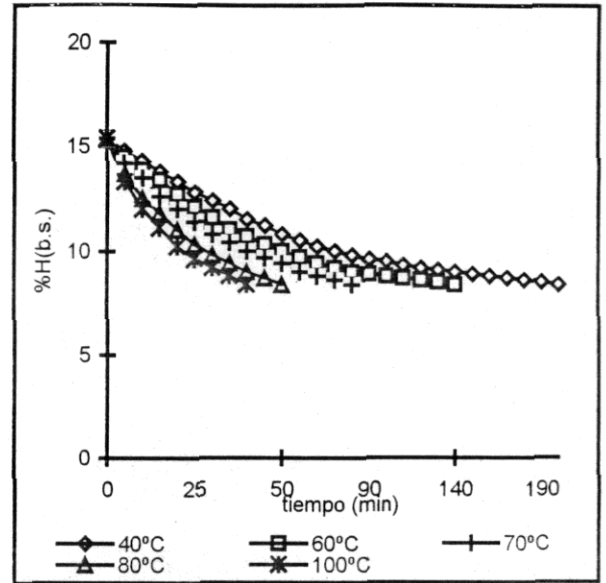


Cinética de secado trigo variedad Salamanca 17% humedad inicial

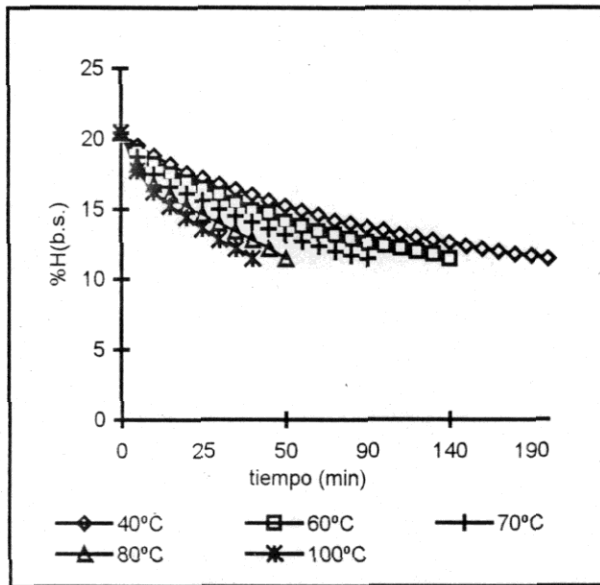
Figura 16 Curvas de secado segundo bloque experimental



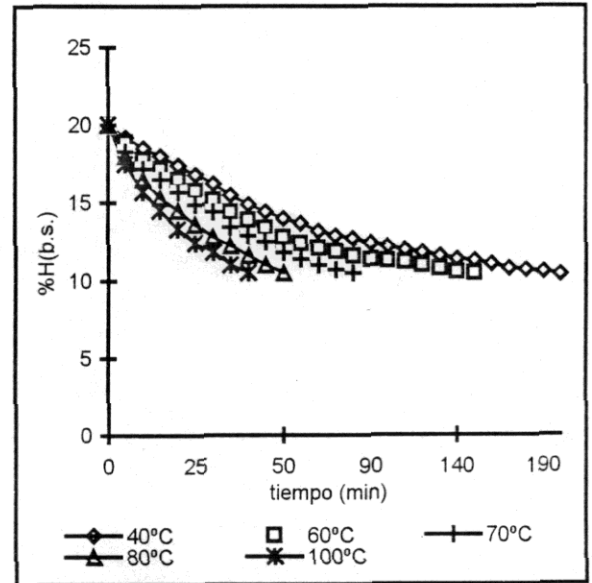
Curva de secado trigo variedad Oasis 15% humedad inicial



Curva de secado trigo variedad Salamanca 15%h humedad inicial



Curva de secado trigo variedad Oasis 20% humedad inicial



Curva de secado trigo variedad Salamanca 20% humedad inicial

Figura 17 Curvas de secado tercer bloque experimental

En general todas las curvas presentaron sólo períodos de secado decreciente, es decir en ningún caso se puede apreciar una relación lineal entre el contenido de humedad en el trigo y el tiempo. Esto concuerda con lo establecido en la literatura (Geankoplis, 1995; Chistonsen, 1974) y en general para cualquier tipo de grano. Como era de esperarse, el aumento en la temperatura de alimentación del aire, favorece las condiciones de secado, es decir con el aumento de este parámetro, aumenta la velocidad de secado. En general en todas estas curvas de secado, se aprecia la misma tendencia, en donde al aumentar la temperatura de alimentación del aire, las pendientes de las curvas de secado se hacen más pronunciadas indicando que la velocidad de secado del trigo aumenta. De ahí que la pérdida de humedad sea más intensa y rápida a las temperaturas de 80 y 100°C. La temperatura dentro del lecho se estabilizó a los 10 min de iniciado el secado y se mantuvo constante durante todo el tiempo de secado. En cuanto a la temperatura de bulbo húmedo se estabilizó a partir de los 5 a 10 min y permaneció más o menos 5°C por abajo de la temperatura de entrada. Las curvas de secado de los granos con un período de mayor intensidad de secado en la zona de velocidad decreciente, muestran que la mayor influencia sobre la velocidad de difusión del agua del interior del grano hacia la superficie la tienen, tanto la temperatura del medio de secado, como la humedad inicial del grano, que se modifica continuamente durante el proceso, incidiendo en el deterioro del mismo. La mayor parte del deterioro ocasionado a los granos, durante el secado, se produce en este período de velocidad decreciente, por ello durante este período debe haber un buen control de temperatura (Ghaly y Taylor, 1982; Geankoplis, 1995). Es posible que la cantidad de humedad que se elimina durante el periodo de velocidad decreciente sea bastante pequeña, no obstante el tiempo requerido puede ser bastante largo. Durante este período de velocidad decreciente la velocidad de secado empieza a disminuir hasta un equilibrio en el contenido de humedad. Como lo ha indicado Bakker-Arkema *et al.* (1978) en este período la velocidad la transferencia de masa depende esencialmente de la temperatura de aire y de las características del grano, sin que afecte el flujo del aire de secado. Siendo que la influencia de la temperatura de secado es uno de los parámetros de mayor significancia para el secado de granos. Para el período de velocidad decreciente de las curvas de secado de las dos variedades de trigo con

diferentes contenidos iniciales de humedad obtenidas a diferentes tiempos y temperaturas de secado muestran que la humedad disminuyó lentamente hasta llegar a una humedad final de entre 8 y 10 % (b.s.) para las cuatro temperaturas probadas. Los resultados obtenidos en este trabajo concuerdan con los reportados por Nellist (1978) y Giner *et al.*, (1991), mostrando que el proceso de secado de granos se lleva a cabo en el período de velocidad decreciente. Tosi *et al.*, (1982) han determinado que la temperatura de secado influye sobre la velocidad de difusión del agua del interior del grano hacia la superficie determinando que la humedad inicial del grano generalmente interactúa con la temperatura de secado y que a mayor humedad del grano la temperatura de secado sea menor. El fenómeno anterior siguió tendencias parecidas para las dos variedades probadas. Bruce, (1992) mostró que los tiempos de secado para diferentes variedades de trigo pueden ser muy cercanos cuando las variedades presentan casi el mismo tamaño. La pérdida de humedad de cada variedad de trigo durante el secado fue influenciada tanto por la temperatura de secado como por la humedad inicial del grano y su estructura. Concordando con los resultados obtenidos por Ghaly y Taylor, (1982) para el secado de variedades de trigos Australianos. La velocidad de eliminación del agua fue diferente según las variedades de trigo pero la forma de eliminación fue esencialmente la misma. Los resultados obtenidos mostraron respuestas de secado para cada variedad de trigo, influenciada, por la estructura del grano con dureza (textura) y contenido de proteína diferentes. Según Fellow, (1994) las características estructurales de los granos, así como sus constituyentes (principalmente proteínas y almidones) determinan la proporción de agua ligada al grano e influye en el secado. El tamaño del grano así como sus constituyentes tales como proteínas y almidones, que aumentan la proporción de agua ligada, pueden influir en la velocidad de secado prolongando esta fase. Cuando el secado inicial del trigo es rápido el agua en la superficie del grano se evapora más rápidamente que el que se desplaza del centro del producto hacia la superficie originando contracción de la capa superficial que opone resistencia al posterior paso de vapor. Si la deshidratación es rápida se forma inmediatamente una capa seca y rígida en la superficie del alimento que fija el volumen del material. La deshidratación posterior de las partes profundas va acompañada de desgarramientos y vacío interno obteniéndose

productos que conservan su forma original pero con estructura interna porosa. Esta contracción es más acusada cuando la deshidratación es lenta y se produce a pesar de la resistencia estructural de los tejidos. Las capas externas del endospermo, particularmente aquellas células debajo de la capa aleurona parece ser la zona que controla la velocidad de eliminación de agua. El endospermo compacto sin espacios aéreos parece retrasar la eliminación de agua. Se ha determinado que los pequeños capilares dentro del grano retienen el agua muy fuertemente por la zona del surco (Hoseney, 1991; Kent 1987). De las curvas obtenidas se puede decir que la disminución de humedad para la variedad de trigo Oasis de textura dura y gluten fuerte con contenido de proteína del 9% fue ligeramente más lenta alcanzando humedades de secado ligeramente mayores que la variedad de trigo suave (Salamanca) de textura suave y gluten débil de un contenido de proteína del 8% que alcanzó humedades de secado menores. El grano suave Salamanca con una estructura menos compacta de su endospermo que la variedad de trigo Oasis así como con menor contenido de proteína pudo haber influido en una disminución ligeramente más rápida de su humedad.

6.1.3. Ecuación de Arrhenius.- Por medio de las curvas de secado se determina que el aumento de temperatura acelera la deshidratación de los granos a partir de un mecanismo difusional a velocidad decreciente (Tosi *et al.* 1986 y Fellow 1994). La velocidad de secado ($-dx/dt$) en función del contenido de humedad (X) y el tiempo de secado dado en kg de agua/ kg de sólido seco para ambas variedades de trigos a las diferentes condiciones estudiadas mostró una relación lineal, con un solo período de secado decreciente. Las tablas del anexo 1 muestran los valores de la constante (k), calculados para cada variedad, contenido de humedad inicial temperatura y diferentes tiempos de secado estudiado. Suponiendo que la constante (k) de secado siguió la ley de Arrhenius, al linearizar la ecuación (13) se obtuvo la energía de activación relacionada con el proceso térmico. Por medio de los valores de la energía de activación se determina que la temperatura de secado afecto la velocidad de difusión del agua del interior hacia la superficie del grano, señalando que a mayor velocidad de secado, menor es la energía de activación. La humedad inicial del grano se fue eliminando a diferentes velocidades dependiendo de la variedad del trigo la humedad inicial del grano y la

temperatura de secado. De tal manera conforme el contenido de humedad inicial del grano fue mayor la energía de activación necesaria para extraer el agua disminuyó (anexo 1). Fellow (1994) y Ghaly y Sutherland (1984) reportaron que las propiedades físicas y químicas de los granos y de sus harinas pueden ser afectadas por un mal tratamiento térmico dañando las membranas celulares al aumentar la concentración de sales y por tanto la presión osmótica.

Las tablas 15 y 16 muestran diferentes valores de las energías de activación dependiendo de la variedad del trigo así como de las condiciones de secado, contenido de humedad inicial del grano, tiempo y temperatura de secado.

Tabla 15 Constante de velocidad de secado (k) y valor de energía de activación (E) de trigo secado durante una hora

%hi T°C	Salamanca			Oasis		
	37%	25%	17%	37%	25%	17%
40	0.0345	0.0301	0.0214	0.0324	0.0279	0.0202
60	0.0377	0.0339	0.0252	0.0334	0.0311	0.0231
80	0.0392	0.0364	0.0260	0.0352	0.0335	0.0246
100	0.0406	0.0382	0.0283	0.0361	0.0354	0.0268
k	-316.79	-471.33	-526.61	-223.62	-472.21	-551.92
(E) kj/kg mol	2633.79	3918.63	4378.23	1859.17	3925.95	4588.66

Constante de velocidad de secado (k) h⁻¹

Tabla 16 Constante de velocidad de secado (k) y valor de la energía de activación (E) de trigo secado a diferentes temperaturas y tiempos de secado

%hi T°C	t(min)	Salamanca		Oasis	
		20%	15%	20%	15%
40	240	0.0095	0.0066	0.0057	0.0042
60	140	0.0186	0.0146	0.0144	0.0097
70	90	0.021	0.0182	0.0184	0.0154
80	50	0.023	0.0196	0.0195	0.0173
100.....	30	0.0261	0.0212	0.0215	0.0199
k		-1937.4	-2276.1	-2618.0	-3173.5
(E) kj/kg mol		16107.54	18923.49	21766.05	26384.47

constante de velocidad de secado (k) h⁻¹

Las temperaturas de secado más elevadas con velocidades de secado rápidas provocan mayores cambios en los granos, que las velocidades de deshidratación más lentas y

temperaturas más bajas. Por lo tanto el control de estos parámetros es de gran importancia para poder mantener la calidad de los granos (Lupano y Añon 1986).

6.1.4. Análisis de varianza cinética de secado.- En general con el análisis de varianza se determinaron las cinéticas generales de secado a partir del estudio del efecto de los factores; variedad, temperatura de secado, humedad inicial del grano tiempo y sus interacciones, sobre la variable de respuesta, medida como pérdida de humedad (b.s.). Se determinó el efecto de los factores variedad, contenido de humedad inicial del grano, temperatura y sus interacciones, en función del tiempo. La pérdida de humedad (b.s.) se midió cada 10 min a partir del tiempo cero.

6.1.4.1. Primer experimento.- El análisis de varianza, como es sabido, se basa en pruebas de hipótesis: a) Hipótesis nula (H_0 = las medias son iguales), la cual indica que no hay efecto significativo de los factores probados; en esta prueba de hipótesis, las medias de las variables de respuesta resultan iguales e implica que los tratamientos no afectan el proceso. En contraste, la b) Hipótesis alterna (H_a = al menos una media resulta diferente) indica que al menos una de las medias es diferente y que los tratamientos sí tienen efectos significativos sobre el proceso. En la tabla 17 se puede observar que la interacción variedad por temperatura resultó menos significativa (a un nivel del 0.0001) que la variedad y la temperatura. Lo anterior quiere decir que la humedad en base seca fue diferente para las variedades y para las temperaturas de secado, pero las variedades respondieron de manera similar a las temperaturas de secado.

Tabla 17 Análisis de varianza cinética de secado

Fuente	GI	SC	CM	F	Prob>F
Tiempo	6	3241.06793	540.177988	988.03	0.0001
Variedad	1	158.867601	158.867601	290.58	0.0001
Temperatura	3	414.812721	138.270907	252.91	0.0001
tiempo X variedad	6	54.133579	9.022263	16.50	0.0001
Variedad X temperatura	3	6.041459	2.013820	3.68	0.0142
tiempo X temperatura	18	124.169917	6.898329	12.62	0.0001
Tiempo X variedad X temperatura	18	23.572479	1.309582	2.40	0.0029
Error	112	0.10503400	0.00093780		
Total	167	4.31879540			

GI= grados de libertad, SC= suma de cuadrados, CM= cuadrado medio, F= coeficiente de varianza

De igual forma el análisis de los tiempos de secado (todo significativo al 0.01%) mostró diferencia significativa de humedad (como era de esperarse) pero las interacciones indican que las curvas de secado de las variedades probadas fueron diferentes y también lo fueron las de las temperaturas de secado. En cambio, la interacción del tiempo por temperatura con respecto a la variedad sobre la pérdida de humedad (b.s) mostró tener menor efecto significativo a un nivel del 0.0001.

6.1.4.2. Segundo experimento.- Los resultados de la tabla 18 muestran efecto significativo para la variedad y para la interacción de la variedad con respecto a la humedad inicial del grano

Tabla 18 Análisis de varianza cinética de secado

Fuente	GI	SC	CM	F	Prob>F
variedad	1	717.42135	717.42135	300.66	0.0001
temperatura	3	7384.43676	2461.47892	1031.56	0.0001
humedad inicial	2	9535.87419	4767.93709	1998.16	0.0001
variedad X temperatura	3	80.15297	26.71766	11.20	0.0001
variedad X humedad. inicial	2	177.39542	88.69771	37.174	0.0001
hum. inicial X temperatura	6	1664.48749	277.41458	116.26	0.0001
variedad X temp X hum. ini	6	99.62247	16.60375	6.96	0.0001
tiempo	7	16101.42056	2300.20294	963.97	0.0001
tiempo X variedad	7	19.08321	2.72617	1.14	0.3346
tiempo X temperatura	21	1247.12750	59.38702	24.89	0.0001
tiempo X humedad inicial	14	3086.79459	220.48533	92.40	0.0001
Tiemp X Temp. X var X hi	119	635.82415	5.34306	2.24	0.0001
Error	576	13744.43	2.386127		
Total	767	42124.07			

GI= grados de libertad, CM= cuadrado medio, F= coeficiente de varianza, SC= suma de cuadrados

En la misma tabla 18 se muestran niveles de significancia de 0.0001, tanto para el contenido de humedad inicial del grano, como para la temperatura de secado y su interacción, así como para la interacción de variedad en relación a la temperatura. En cambio, no muestra efecto significativo la interacción del tiempo en relación a la variedad sobre la humedad (b.s.). Este análisis también mostró que tanto la humedad del grano como las temperatura de secado, presentaron mayor efecto significativo que la variedad de trigo y que para ambas variedades de trigo, al aumentar la temperatura, aumentó la velocidad de secado.

6.1.4.3. Tercer experimento.-Los resultados de la tabla 19 muestran efecto significativo 0.0001 para la variedad, la humedad, el tiempo, la temperatura y sus interacciones. Los resultados indican que la pérdida de humedad (b.s), para las variedades de trigo con contenidos de humedad inicial y temperaturas de secado diferentes, disminuye de manera diferente durante cada período de tiempo de secado.

Tabla 19 análisis de varianza cinética de secado

Fuente	GI	SC	CM	F	Prob>F
variedad	1	181.19322	181.19322	9999.99	0.0001
temperatura	4	41.5447676	10.3861992	14074.11	0.0001
humedad inicial	1	2172.17780	2172.17780	99999.99	0.0001
variedad X temperatura	4	117.49591	29.37398	39804.08	0.0001
variedad X humedad. inicial	1	8.4836142	8.483611	11495.96	0.0001
hum. inicial X temperatura	4	33.5441049	8.3860258	11363.73	0.0001
variedad X temp X hum. ini	4	55.19616	13.79904	18698.80	0.0001
tiempo	42	5968.96579	142.11823	99999.99	0.0001
tiempo X variedad	42	91.25747	2.17280	2944.31	0.0001
tiempo X temperatura	50	2634.36780	52.68736	71395.56	0.0001
tiempo X humedad inicial	42	199.318609	4.7456833	6430.78	0.0001
Tiemp X temp X var X hi	189	87.022915	0.46044	623.93	0.0001
Error	770	3.03639715	0.0039433		
Total	775	26.6192763			

GI= grados de libertad, SC= suma de cuadrados, CM= cuadrado medio, F= coeficiente de varianza

No obstante, conforme el tiempo transcurre, la pérdida de humedad (b.s.) para ambas variedades de trigo tiende a comportarse de manera similar alcanzando los mismos niveles finales de humedad.

6.1.5. Análisis de medias por la prueba de Tukey .-El análisis de medias por la prueba de Tukey (Tabla 20) mostró resultados iguales en los tres bloques experimentales indicando diferencia significativa tanto para variedad, temperatura, así como para los diferentes tiempos de secado.

Tabla 20 Análisis de medias, prueba de Tukey.(primer experimento)

Temperatura °C	Oasis	Salamanca
40	16.09 ^a	15.07 ^a
60	14.68 ^b	13.06 ^b
80	12.55 ^c	12.11 ^c
100	10.20 ^d	9.00 ^d

medias con mismo índice no son diferentes estadísticamente ($p < 0.05$), solo para cada variedad y no entre variedades

Los promedios de humedades (base seca) indicaron, para la variedad Oasis, promedios mayores que para la variedad Salamanca. Esto indica que la variedad Salamanca llegó a un menor nivel de humedad que la variedad Oasis. indicando con esto que la perdida de humedad del trigo depende tanto de las características estructurales de la variedad como de las condiciones de secado. Las medias de los porcentajes de humedad (b.s.) para temperatura, fueron disminuyendo en relación directa al aumento de temperatura como era de esperarse.

Tabla 21 Análisis de medias, prueba de Tukey (segundo experimento)

Temperatura°C	Oasis			Salamanca		
	17%h	25%h	37%h	17%h	25%h	37%h
40	13.5 ^a	17.5 ^a	25.0 ^a	12.86 ^a	16.5 ^a	20.0 ^a
60	11.5 ^b	15.5 ^b	21.0 ^b	10.63 ^b	13.5 ^b	17.4 ^b
80	10.0 ^c	14.0 ^c	17.5 ^c	9.15 ^c	10.6 ^c	14.4 ^c
100	8.5 ^d	12.5 ^d	13.5 ^d	7.65 ^d	8.0 ^d	10.9 ^d

medias con mismo índice no son diferentes estadísticamente (p< 0.05), solo para cada variedad y no entre variedades

Tabla 22 Análisis de medias, prueba de Tukey (tercer experimento)

Temperatura °C/tiempo(min)	Oasis		Salamanca	
	15%h	20%h	15%h	20%h
40 °C 240 min	9.85 ^a	11.76 ^a	8.89 ^a	10.75 ^a
60 °C 140 min	9.75 ^a	11.65 ^a	8.36 ^a	10.45 ^a
70 °C 90 min	9.35 ^a	11.66 ^a	8.62 ^a	10.45 ^a
80 °C 50 min	9.23 ^a	11.46 ^a	8.43 ^a	10.42 ^a
100 °C 30 min	9.25 ^a	11.74 ^a	8.25 ^a	10.55 ^a

medias con mismo índice no son diferentes estadísticamente (p< 0.05), solo para cada variedad y no entre variedades

6.2. Efecto del secado sobre la calidad del trigo

6.2.1. Primer bloque experimental.

6.2.1.1. Pruebas físicas:

6.2.1.1.1. Peso hectolítrico.- El peso hectolítrico es característico de cada variedad y depende de la densidad, uniformidad y materia que compone el grano así como de la forma, peso, humedad y el contenido de impurezas Housley *et al* (1981), Pomeranz (1988) y Hosenev (1991) mostraron que el peso hectolítrico son parámetros de calidad, característicos de cada variedad, relacionados con el uso final del trigo. Como lo indicó Pomeranz, (1988) el peso hectolítrico es considerado por el molinero como características importantes relacionadas con el porcentaje de extracción de harina para productos panificables, a mayor peso hectolítrico mayor extracción de harina y se utilizan generalmente a nivel mundial en la comercialización del trigo para determinar su precio y uso industrial. La tabla 23 indica que el análisis estadístico de los valores para peso hectolítrico, mostraron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre variedades y temperaturas de secado. Las medias del peso hectolítrico resultaron significativamente mayores para la variedad Oasis de textura dura, que para la variedad Salamanca de textura suave, como era de esperarse debido a las características intrínsecas de cada variedad.

Tabla 23 Peso hectolítrico respecto a variedad de trigo

Variedad	¹ph (kg/hl)
Oasis	77.69 ^a
Salamanca	76.50 ^b

¹peso hectolítrico, Medias con mismo índice no son diferentes estadísticamente ($p < 0.05$).

Esta determinación disminuyó para ambas variedades de trigos sometidos a tratamiento térmico en comparación con el trigo control correspondiente, pero no indican el grado del daño causado al trigo, porque no presentan relación directa con el incremento de la temperatura, lo cual coincide con los resultados reportados por Finney *et al* (1962) Kirleis *et al* (1982) y Tosi *et al.* (1986). El peso hectolítrico se encontró dentro del rango para trigo de gluten suave grupo III (variedad trigo Salamanca) y para trigo de gluten fuerte grupo I (variedad trigo Oasis) cuyas especificaciones para el grado de Calidad México

varía de entre 84 kg/hl para el caso de trigos de gluten fuerte y de 78 kg/hl para trigos de gluten suave (Norma oficial Mexicana 1982).

Tabla 24 Peso hectolítico, respecto a temperaturas de secado

	Salamanca	Oasis
temperatura control	¹ ph (kg/hl)	¹ ph (kg/hl)
40°C	79.17 ^a	81.25 ^a
60°C	75.48 ^c	75.90 ^d
80°C	76.56 ^b	76.97 ^c
100°C	76.40 ^b	77.61 ^b
	75.33 ^c	76.84 ^c

¹peso hectolítico, medias con mismo índice no son diferentes estadísticamente ($p < 0.05$).

6.2.1.1.2. Peso de 1000 granos.- El peso del grano es una característica que depende de su tamaño y densidad, siendo también un estimador del rendimiento harinero. El peso de 1000 granos para las variedades mexicanas varía de entre 32 y 40 g siendo los valores menores para los trigos suaves del grupo IV y mayores para los del gluten fuerte del grupo I. El análisis estadístico (tabla 25) para el peso del grano, mostró diferencias significativas ($p < 0.05$) entre variedades y temperaturas de secado. Se observa que los pesos para la variedad Oasis resultaron mayores que los de la variedad Salamanca, como era de esperarse debido a la variedad de trigo.

Tabla 25 Peso de 1000 granos respecto a variedad de trigo.

variedad	peso 1000 granos (g)
Oasis	41.280 ^a
Salamanca	40.10 ^b

²peso de 1000 granos, Medias con mismo índice no son diferentes estadísticamente ($p < 0.05$).

La tabla 26 muestra que el peso de 1000 granos de los trigos de ambas variedades que fueron sometidos a tratamiento térmico resultaron con valores mayores que el trigo testigo y que fueron disminuyendo conforme la temperatura de secado aumentó, como es de esperarse ya que al aumentar la temperatura pierde más agua el grano. En general esta determinación resultó poco confiable con valores dispersos, que no indican claramente el grado de daño térmico causado al trigo.

Tabla 26 Peso de 1000 granos respecto a las temperaturas de secado.

	Salamanca	Oasis
Temperatura	²peso	²peso
Control	40.59 ^a	41.6 ^a
40°C	41.60 ^b	42.0 ^b
60°C	41.11 ^b	41.7 ^b
80°C	40.50 ^c	41.5 ^c
100°C	39.57 ^d	40.07 ^d

²peso de 1000 granos (g), medias con mismo índice no son diferentes estadísticamente ($p < 0.05$).

6.2.1.1.3.Dureza.- Otra característica importante del grano es la textura o dureza, esta determinación también está relacionada directamente con el rendimiento molinero y con la calidad panadera del trigo. Los trigos con aspecto vítreo y duro generalmente son de alto contenido de proteína y producen harinas de textura granular que permiten producir panes leudados. Los trigos con aspecto suave harinoso son más apropiados para la producción de pasteles (Pomeranz, 1988). Los trigos suaves durante el perlado pierden más peso, en tanto que los duros pierden menos peso, por lo tanto los valores bajos en índice de dureza corresponden a trigos duros (variedad Oasis) en tanto que los valores altos a trigos suaves (variedad Salamanca). El análisis estadístico de los valores para el índice de dureza, mostró diferencias significativas ($p < 0.05$) entre variedades y temperaturas de secado. La media del porcentaje de dureza fue significativamente menor para la variedad Oasis de textura más dura, que para la variedad Salamanca de textura suave (tabla 27)

Tabla 27 índice de dureza respecto a variedad de trigo.

variedad	dureza (%)
Oasis	41.987 ^b
Salamanca	58.38 ^a

Medias con mismo índice no son diferentes estadísticamente ($p < 0.05$).

Los resultados del índice de dureza de los trigos sometidos a secado a temperaturas de 40 y 60C resultaron para ambas variedades con valores ligeramente más altos en comparación con los trigos testigo (tabla 28). Estos valores también resultaron muy dispersos y no muestran el grado de daño térmico del trigo

Tabla 28 índice de dureza respecto a las temperaturas de secado.

	Salamanca	Oasis
	³ Id (%)	³ Id (%)
temperatura		
Control	58.5 ^d	40.0 ^d
40°C	60.5 ^b	44.8 ^a
60°C	63.3 ^a	43.8 ^b
80°C	59.0 ^c	41.3 ^c
100°C	57.0 ^e	35.0 ^e

³ Id= índice de dureza Medias con mismo índice no son diferentes estadísticamente (p<0.05).

En general las propiedades físicas de los granos mostraron cambios significativos con respecto a la temperatura de secado, principalmente el peso hectolítrico y la dureza del grano.

6.2.1.2. Rendimiento molinero.- Las harinas obtenidas de la molienda experimental se tamizaron en una malla 9 XX (0.149mm) para ser analizadas. El análisis estadístico de los valores para el rendimiento molinero solo mostró diferencias significativas (p<0.05) entre variedades. El rendimiento molinero se encontró entre valores de 60 a 65 % para todos los casos de las dos variedades (tabla 29). Se presentaron rendimientos molineros bajos ya que los óptimos se encuentran entre 70-75%, lo cual puede ser debido al tipo de molino de laboratorio usado (Pomeranz, 1988). El rendimiento molinero no fue afectado por la temperatura de secado. Los resultados obtenidos coinciden con los reportados por Finney *et al.*, (1962) Se ha reportado que en tratamientos de secado 80 y 100°C, presentó una disminución del 5 % en el rendimiento molinero y las harinas resultaron con mayor cantidad de cenizas en tanto Kirleis *et al.*, (1982) secaron trigo con humedades iniciales de entre 15 y 45%h a temperaturas de 38, 66 y 93°C, usando un secador de tolva para granos, hasta alcanzar una humedad final del 13% y no reportaron cambios sobre el potencial harinero de trigo.

Tabla 29 Rendimiento molinero respecto a variedad de trigo.

variedad	⁸RM (%)
Oasis	65.2 ^a
Salamanca	64.8 ^b

RM= rendimiento molinero. Medias con mismo índice no son diferentes estadísticamente (p<0.05).

Tabla 30 Rendimiento molinero respecto a las temperaturas de secado.

	Salamanca	Oasis
temperatura	⁸ RM (%)	⁸ RM (%)
control	64.8 ^a	65.2 ^a
40°C	64.8 ^a	65.4 ^a
60°C	64.5 ^a	65.0 ^a
80°C	65.0 ^a	65.2 ^a
100°C	64.8 ^a	65.4 ^a

⁸ rendimiento molinero. Medias con mismo índice no son diferentes estadísticamente ($p < 0.05$).

6.2.1.3. Pruebas físicas y químicas de las Harina:

6.2.1.3.1. Cenizas.- Como se muestra en las tablas 31 y 32 los porcentajes de cenizas de las harinas obtenidas a partir de los trigos secados y sus controles, presentaron diferencias significativa ($p < 0.05$) solo entre variedades, lo cual indica que el tratamiento térmico no afectó el contenido de minerales (cenizas) de las harinas, como lo reportado por Kirsley *et al.* (1982)

Tabla 31 Porcentaje de cenizas de harinas respecto a variedad de trigo.

variedad	⁷ C (%)
Oasis	0.553 ^a
Salamanca	0.468 ^b

⁷ Porcentaje cenizas, ⁸ Medias con mismo índice no son diferentes estadísticamente ($p < 0.05$).

Tabla 32 Porcentaje de cenizas de harinas respecto a las temperaturas de secado.

	Salamanca	Oasis
temperatura	⁷ C (%)	⁷ C (%)
Control	0.40 ^a	0.57 ^a
40°C	0.49 ^a	0.53 ^a
60°C	0.50 ^a	0.59 ^a
80°C	0.45 ^a	0.56 ^a
100°C	0.45 ^a	0.55 ^a

⁷ Porcentaje cenizas, Medias con mismo índice no son diferentes estadísticamente ($p < 0.05$).

6.2.1.3.2. Proteína de harina.- Los porcentajes de proteína total de las harinas obtenidas a partir de los trigos secados y sus controles también presentaron diferencia significativa ($p < 0.05$) sólo entre variedades, indicando que el tratamiento térmico no afectó el

contenido total de nitrógeno proteico de las harinas, coincidiendo con lo reportado por Tosi *et al.* (1982). Ambas variedades tuvieron porcentajes de proteína bajos y muy cercanos entre si, de 8.0% para la variedad de trigo Salamanca y 9.0 para la Oasis (tabla 33 y 34). Kent (1987) y Pomeranz (1988) indican que el contenido de proteína de las diferentes variedades de trigo depende tanto de factores genéticos como del ambiente en el que se cultivan.

Tabla 33 Porcentaje de proteína de las harinas respecto a variedad de trigo.

Variedad	⁴proteína (%)
Oasis	9.3875 ^a
Salamanca	8.328 ^b

⁴proteína total. Medias con mismo índice no son diferentes estadísticamente ($p < 0.05$).

Tabla 34 Porcentaje de proteína de las harinas respecto a las temperaturas de secado.

	Salamanca	Oasis
temperatura	⁴proteína (%)	⁴proteína (%)
control	8.5 ^a	9.4 ^a
40°C	8.4 ^a	9.5 ^a
60°C	8.0 ^a	9.3 ^a
80°C	8.4 ^a	9.5 ^a
100°C	8.2 ^a	9.3 ^a

⁴proteína total. Medias con mismo índice no son diferentes estadísticamente ($p < 0.05$).

6.2.1.3.3.Sedimentación de harina de trigo.- Las medias de los porcentajes de sedimentación para las harinas mostraron diferencias significativa ($p < 0.05$) entre variedades y temperaturas. En general los valores de sedimentación de las harinas de trigo fueron mayores para la variedad Oasis indicando mayor fuerza del gluten que para la variedad Salamanca (debido a las características de la variedad) (tabla 35).

Tabla 35 Sedimentación de las harinas respecto a variedad de trigo.

Variedad	⁶Sedimentación (ml)
Oasis	51.5 ^a
Salamanca	35.5 ^b

⁶sedimentación. Medias con mismo índice no son diferentes estadísticamente ($p < 0.05$).

Zeleny *et al.*, (1963) indicaron que esta prueba presenta un buen índice de confiabilidad para medir la calidad de las harinas. Para ambas variedades de trigo las harinas tratadas a mayor temperatura de secado tuvieron valores menores que el control (tabla. 36). Los valores promedio de sedimentación resultaron bajos para ambas variedades de trigo en comparación con los reportados por Irizar 1990 y Salazar 1989 (que reportan valores de 61 ml para la variedad Oasis y de 42 ml para la variedad Salamanca) lo cual puede ser atribuido a problemas del desarrollo del método como lo reportaron Findley (1962), Sibbitt y Gilles (1962), Durham (1962) y Schlesinger (1963)

Tabla 36 Sedimentación de las harinas respecto a las temperaturas de secado.

	Salamanca	Oasis
Temperatura	⁶ Sedimentación(ml)	⁶ Sedimentación (ml)
Control	52.3 ^a	35.5 ^a
40°C	51 ^b	33.5 ^b
60°C	50.5 ^c	30.5 ^c
80°C	49.3 ^d	28.5 ^d
100°C	35.5 ^e	25.0 ^e

⁶sedimentación,. Medias con mismo índice no son diferentes estadísticamente ($p < 0.05$).

6.2.1.3.4. Porcentaje de gluten.- Las medias de los porcentajes de gluten para las harinas mostraron diferencia significativa ($p < 0.05$) entre variedades y temperaturas (tabla 37). La variedad de trigo Oasis mostró mayor contenido de gluten que la Salamanca (como era de esperarse).

Tabla 37 Porcentaje de gluten de las harinas respecto a variedad de trigo.

Variedad	⁵Gluten(%)
Oasis	7.6 ^a
Salamanca	5.0 ^b

⁵gluten. Medias con mismo índice no son diferentes estadísticamente ($p < 0.05$).

Los valores del porcentaje de gluten disminuyeron directamente con el aumento de temperatura (tabla 38). Diversos estudios realizados para determinar la influencia del tratamiento térmico sobre la calidad del trigo, consideran principalmente el efecto de la

temperatura sobre la proteína del gluten (Kent, 1987; Boot *et al.*, 1980; Draper y Stewart, 1980; Warner *et al.*, 1994).

Tabla 38 Porcentaje de gluten de las harinas respecto a las temperaturas de secado.

Temperatura	<i>Salamanca</i>	<i>Oasis</i>
	⁵ gluten (%)	⁵ gluten (%)
control	7.2 ^a	9.9 ^a
40°C	7.4 ^a	9.6 ^a
60°C	6.8 ^b	8.9 ^b
80°C	4.0 ^c	6.0 ^c
100°C	0.004 ^d	4.0 ^d

⁵gluten, medias con mismo índice no son diferentes estadísticamente ($p < 0.05$).

La figura 18 muestra para ambas variedades de trigo una reducción del área del gluten en relación directa con el aumento de temperatura de secado, además se observaron modificaciones en las características de expansión de las muestras del trigo que fue sometido a proceso de secado principalmente para la variedad Salamanca ya que generalmente las variedades de gluten suave son más extensibles que las variedades de gluten fuerte.

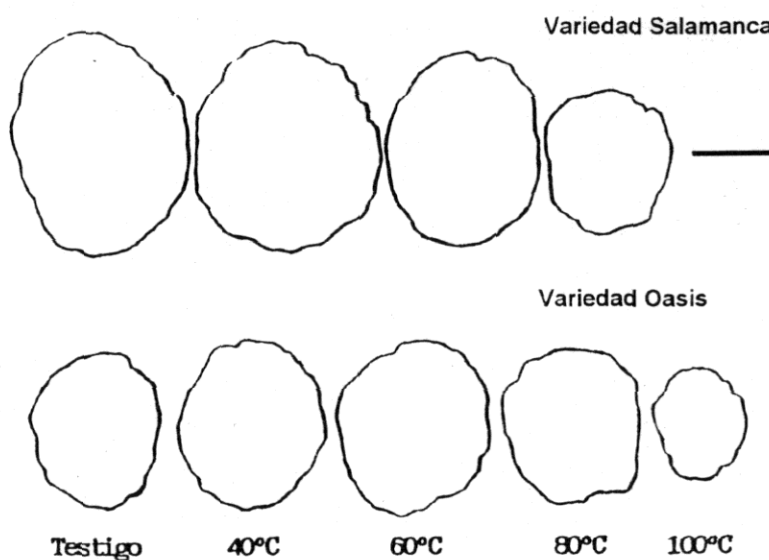


Figura 18 Gluten de ambas variedades de trigo secado a diferentes temperaturas

La variedad de trigo Salamanca secada a 100°C presentó un gluten totalmente desintegrado con el mayor grado de gluten dañado por el calor de acuerdo con

resultados obtenidos por Tosi *et al* (1986). El tratamiento térmico produjo mayores cambios sobre el gluten del trigo Salamanca, indicando menor resistencia al tratamiento térmico que la variedad Oasis. Weegels *et al.*, 1994 indicaron que la funcionalidad del trigo es impartida principalmente por el gluten. La determinación del porcentaje del gluten mostraron claramente los cambios que el tratamiento térmico produce al trigo, además de estar relacionado con el contenido de proteína total (ya que aproximadamente el 80 % del gluten deshidratado es proteína) además de ser una prueba fácil de realizar. El contenido y calidad de las proteínas (tipo gluten) determinan las características reológicas y panaderas de las variedades, pero como lo reportó Kent (1987), la calidad del gluten es afectada por las altas temperaturas de secado. Estos resultados fueron similares a los reportados por Tosi *et al.* (1986) y Weegels *et al.* (1994) quienes concluyen que no hubo pérdidas de material nitrogenado pero si modificaciones de las propiedades del gluten, como consecuencia del efecto que ejercen las altas temperaturas de proceso sobre las proteínas (principalmente gliadinas y gluteninas).

6.2.1.4 Pruebas reológicas de calidad de masas de trigo

6.2.1.4.1. Farinografo.- El análisis estadístico realizado para evaluar las características reológicas de las masas de trigo reveló diferencias significativas ($p < 0.05$) entre variedades y temperaturas. Los valores del tiempo de desarrollo, estabilidad de las masas y el índice de tolerancia, medidos con el farinógrafo de Brabender, resultaron como era de esperarse mayores para la variedad Oasis de gluten fuerte (tabla 39).

Tabla 39 Características reológicas de las masas de trigo medidas con el farinógrafo de Brabender respecto a variedad de trigo.

<i>variedad</i>	¹ <i>t (min)</i>	² <i>abs(%)</i>	³ <i>itm(UB)</i>	<i>e (min)</i>
Oasis	1.51 ^a	56.37a	73.6 ^a	3.49 ^a
Salamanca	1.34 ^b	41.14b	51.00 ^b	2.39 ^b

¹tiempo de desarrollo, ²absorción de agua ³índice de tolerancia al mezclado en unidades Brabender. e= estabilidad de las masas. Medias con el mismo índice no son diferentes estadísticamente ($p < 0.05$).

La tabla 40 muestra los valores del tiempo de desarrollo y estabilidad de las masas, medidos con el farinógrafo de Brabender, aumentaron mientras que el índice de tolerancia al mezclado disminuyó en relación directa con la temperatura.

Tabla 40 Características reológicas de las masas de trigo medidas con farinógrafo de Brabeder respecto a las temperaturas de secado.

	Salamanca				Oasis			
	¹ td (min)	² abs (%)	³ itm (UB)	⁴ e (min)	¹ td (min)	² abs (%)	³ itm (UB)	⁴ e (min)
temperatura								
Control	1.48 ^b	43 ^a	70 ^a	1.2 ^c	1.72 ^b	56 ^{ab}	110 ^a	2.78 ^c
40°C	1.30 ^c	42.5 ^a	50 ^c	1.9 ^d	1.47 ^c	57 ^a	70 ^c	2.59 ^d
60°C	1.20 ^d	40 ^c	65 ^b	1.4 ^c	1.30 ^d	56 ^b	98 ^b	2.88 ^c
80°C	1.62 ^a	41.5 ^{ab}	30 ^e	3.45 ^b	1.90 ^a	56 ^b	40 ^e	3.98 ^b
100°C	1.14 ^e	41 ^b	40 ^d	4.05 ^a	1.18 ^e	57 ^a	50 ^d	5.25 ^a

¹tiempo de desarrollo, ²absorción de agua ³índice de tolerancia al mezclado en unidades Brabender, . Medias con el mismo índice no son diferentes estadísticamente (p<0.05).

La absorción de agua de la masa para ambas variedades de trigos secados a 40 y 60°C resultó ligeramente mayor que la de las masas testigo, siendo menor en masas de trigos secados a 80 y 100°C.

Las curvas farinográficas para las dos variedades de trigo en orden ascendente de temperatura (figura 18) muestran que las altas temperaturas de secado, influyeron directamente sobre las características reológicas de las masas del trigo (tiempo óptimo de mezclado, estabilidad y tolerancia al mezclado), provocando la desnaturalización térmica del gluten, como lo reportaron Preston *et al.* (1989). Schoefield *et al.* (1983) encontraron que durante el tratamiento térmico del gluten pueden generarse reacciones moleculares de intercambio disulfuro-sulfhidrilo debidas probablemente al desdoblamiento de las proteínas sometidas a altas temperaturas y que pueden influir en el comportamiento reológico de las masas. Los farinogramas de las masas para ambas variedades de trigo presentaron suficiente fuerza pero en contraste presentaron bajo porcentaje de gluten y volumen del pan debido a la desnaturalización de la proteína. Ghaly *et al.* (1973) señalaron que los parámetros medidos con un farinógrafo de Brabender no fueron buenos indicadores del tratamiento térmico del trigo debido al fenómeno de desnaturalización que sufren las proteínas. Reportaron resultados para varias muestras sometidas a tratamiento térmico dando curvas farinográficas típicas fuertes con buen valor valorimétrico y con pobre volumen del pan atribuyendo el efecto a

las altas temperaturas de secado sobre las enzimas del trigo. Señalaron que la inactivación térmica enzimática pudo haber provocado una disminución de la producción de gas y un menor volumen de la hogaza.

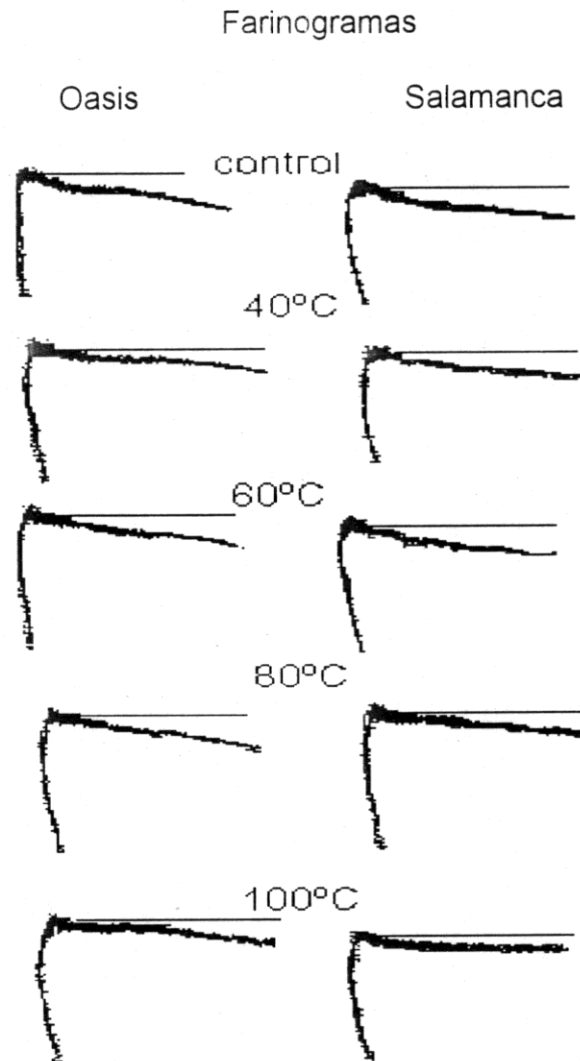


Figura 19 Farinogramas trigo variedad Oasis y Salamanca

En cambio Weegels *et al.* (1994) lograron determinar adecuadamente con este mismo equipo las características de mezclado de las masas del trigo que fue sometido a tratamiento térmico.

6.2.1.4.2. Extensógrafo.- La tabla 41 muestra que la variedad Oasis presentó menor extensibilidad y mayor resistencia a la extensión que la variedad Salamanca, lo cual era

de esperarse debido a que la variedad Salamanca es suave y de gluten más extensible que la variedad Oasis (de gluten fuerte). El análisis estadístico de los valores extensográficos de las masas de trigo reveló diferencias significativas ($p < 0.05$) entre variedades y temperaturas.

Tabla 41 Características reológicas de las masas de trigo medidas con el extensografo de Brabender respecto a variedad de trigo.

Variedades	⁵ext(cm)	⁶re(UB)	⁷a(cm²)
Oasis	10.96 ^b	761.43 ^a	156.4 ^a
Salamanca	13.25 ^a	649.46 ^b	110.5 ^b

⁴extensibilidad, ⁵resistencia a la extensión en unidades Brabender, ⁶área bajo la curva, medias con el mismo índice no son diferentes estadísticamente ($p < 0.05$).

Los parámetros medidos a las masas de trigo con el extensografo de Brabender indicaron aumento de la resistencia a la extensión (tenacidad) y disminución de la extensibilidad de las masa, conforme la temperatura de secado se incrementó (tabla 42). Cuando el tratamiento térmico del trigo fue muy drástico se produjo gluten muy tenaz que no fue posible desarrollar adecuadamente.

Tabla 42 Características reológicas de las masas de trigo medidas con el extensografo de Brabender respecto a las temperaturas de secado.

	Salamanca			Oasis		
	⁵ext (cm)	⁶r (UB)	⁷aa (cm²)	⁵ext (cm)	⁶re (UB)	⁷aa (cm²)
Temperatura Control	17.0 ^b	400 ^e	123 ^c	13 ^b	595 ^e	168 ^c
40°C	19.3 ^a	520 ^d	140 ^a	15.6 ^a	636 ^d	186 ^a
60°C	14.3 ^c	600 ^c	130 ^b	11.4 ^c	700 ^c	170 ^b
80°C	11.45 ^d	725 ^b	95.5 ^d	10.2 ^d	876 ^b	138 ^d
100°C	4.25 ^e	1000 ^a	64.0 ^e	4.6 ^e	1000 ^a	118 ^e

⁵extensibilidad, ⁶resistencia a la extensión en unidades Brabender, ⁷área bajo la curva, medias con el mismo índice no son diferentes estadísticamente ($p < 0.05$).

La resistencia de la masa a la tensión hasta llegar al rompimiento se traduce en las curvas de la figura 20. Ambas variedades de trigo secadas a 40 y 60°C produjeron extensogramas con mayor área que el testigo lo que es indicativo de una mayor fuerza y por tanto mayor capacidad de retener gas. En cambio los trigos secados a 80 y 100°C presentaron masas con menor fuerza, más tenaces y poca elasticidad.

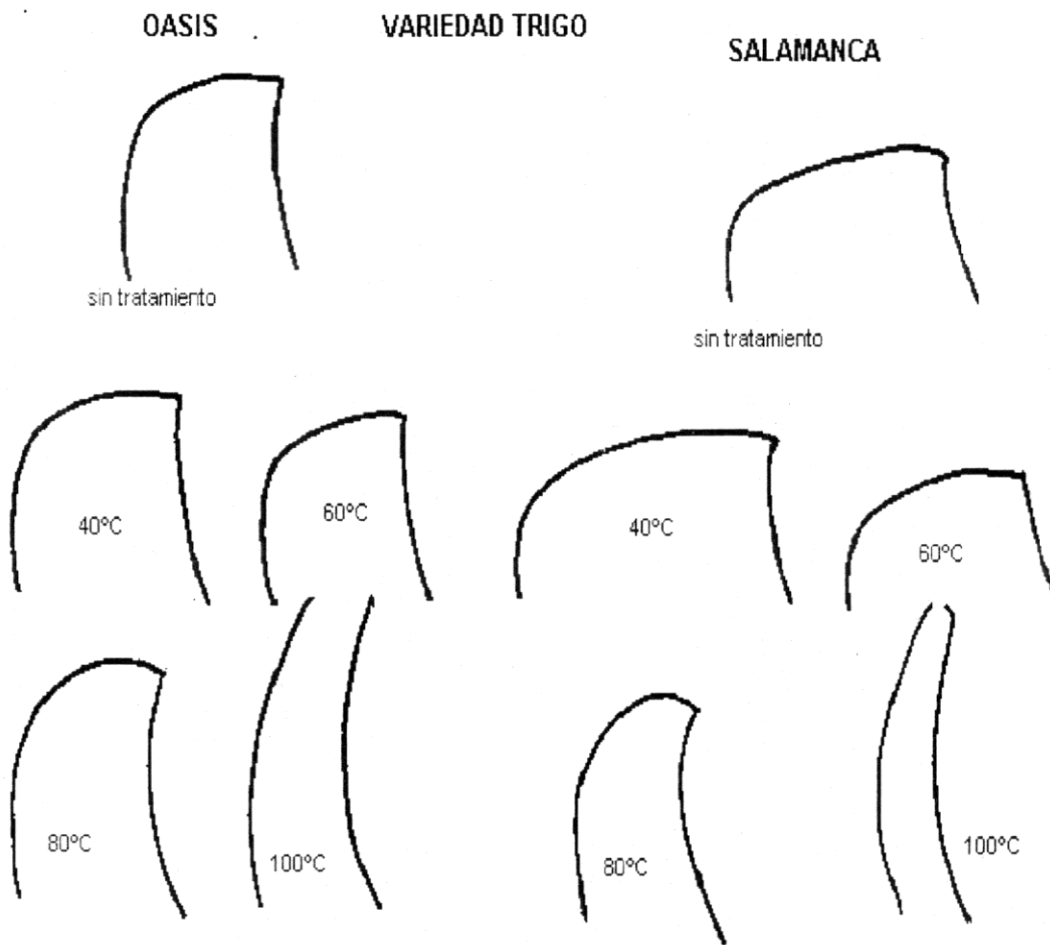


Figura 20 Extensogramas trigo variedad Oasis y Salamanca

Jeanjean *et al.* (1980), Kent (1987) y Weegels *et al.* (1994) reportaron que el trigo con bajo contenido de proteína y gluten de poca fuerza sometido a proceso térmico de secado mejoró ligeramente sus características de panificación aumentando la fuerza de la masa debido a leves modificaciones de las proteínas del gluten. En tanto el calentamiento del trigo a altas temperaturas produjo gluten muy tenaz, es decir menos elástico y extensible. El extensógrafo de Brabender proporcionó medidas de la calidad del gluten para ambas variedades, detectando el daño por calor producido al trigo.

Los resultados de la disminución en la extensibilidad y aumentó en la tenacidad de la masa debido al tratamiento térmico reflejó modificación en la calidad industrial del trigo. Schofield *et al.*, (1983) Lupano y Añon (1987) Pomeranz (1991), y Weegels *et al.* (1994)

señalaron que los cambios de las propiedades físicas de las masas se derivan de la desnaturalización de las proteínas del gluten con la posterior aparición de agregados proteínicos formados durante el secado del trigo causando una disminución de la extensibilidad y un aumento en la tenacidad de las masas.

6.2.1.4.3. Alveografo.- El análisis estadístico mostró efecto significativo ($p < 0.05$) tanto de la variedad como de la temperatura para los parámetros medidos a las masas de trigo con el alveografo de Chopin. Con el alveógrafo de Chopin también se determinó mayor tenacidad de las masas de trigo para la variedad de trigo Oasis y mayor extensibilidad para la variedad Salamanca debido a las características intrínsecas de cada variedad de trigo (tabla 43).

Tabla 43 Características reológicas de las masas de trigo medidas con el Alveografo de Chopin respecto a variedad de trigo.

	¹ <i>l</i> (mm)	² <i>t</i> (mmx1.1)	³ <i>t/l</i>	⁴ <i>w</i> (ergs x 10 ³ /g de masa)
variedad				
Oasis	38.5 ^b	124.6 ^a	2.77 ^b	232.8 ^a
Salamanca	47.84 ^a	98.4 ^b	3.74 ^a	149.4 ^b

¹ extensibilidad, ² tenacidad, ³ relación tenacidad/extensibilidad, ⁴ fuerza de la masa, (ergs x 10³ /g de masa). Medias con el mismo índice no son diferentes estadísticamente ($p < 0.05$).

Tabla 44 Características reológicas de las masas de trigo medidas con el alveografo de Chopin respecto a la temperatura de secado

	Salamanca				Oasis			
	¹ <i>l</i> (mm)	² <i>t</i> (mmx1.1)	³ <i>t/l</i>	⁴ <i>w</i>	¹ <i>l</i> (mm)	² <i>t</i> (mmx1.1)	³ <i>t/l</i>	⁴ <i>w</i>
temperatura								
Control	59.3 ^b	75 ^e	1.26 ^d	125 ^b	44 ^a	100.35 ^d	2.2 ^c	208 ^a
40°C	59.9 ^c	87.65 ^d	1.47 ^d	130 ^a	49.5 ^c	120.1 ^c	2.4 ^c	210 ^a
60°C	50 ^d	88.1 ^c	1.76 ^c	145	46 ^b	124 ^c	2.69 ^c	229 ^b
80°C	40.5 ^a	97.9 ^b	2.4 ^b	160 ^d	32.	130 ^b	4.0 ^b	240 ^c
100°C	30.0 ^e	145.8 ^a	4.8 ^a	187 ^e	20	149.7 ^a	7.4 ^a	277 ^d

¹ extensibilidad, ² tenacidad, ³ relación tenacidad/extensibilidad, ⁴ fuerza de la masa, (ergs x 10³ /g de masa). Medias con el mismo índice no son diferentes estadísticamente ($p < 0.05$). Solo para cada variedad pero no entre variedades

Los resultados para la variedad Salamanca indican que se trata de una harina que corresponde a trigos del grupo III caracterizado por tener gluten débil tenaz, cuya fuerza general es menor de 200 X10³ ergs. En cambio los resultados para la variedad oasis indican que se trata de una harina de gluten medio fuerte perteneciente al grupo II cuya

fuerza general es mayor de 200×10^3 erg. Para ambas variedades de trigo el aumento de la tenacidad y disminución en la extensibilidad de las masas de trigo se produjo en relación directa al aumento de temperatura en comparación con los trigos testigo. (tabla 44).

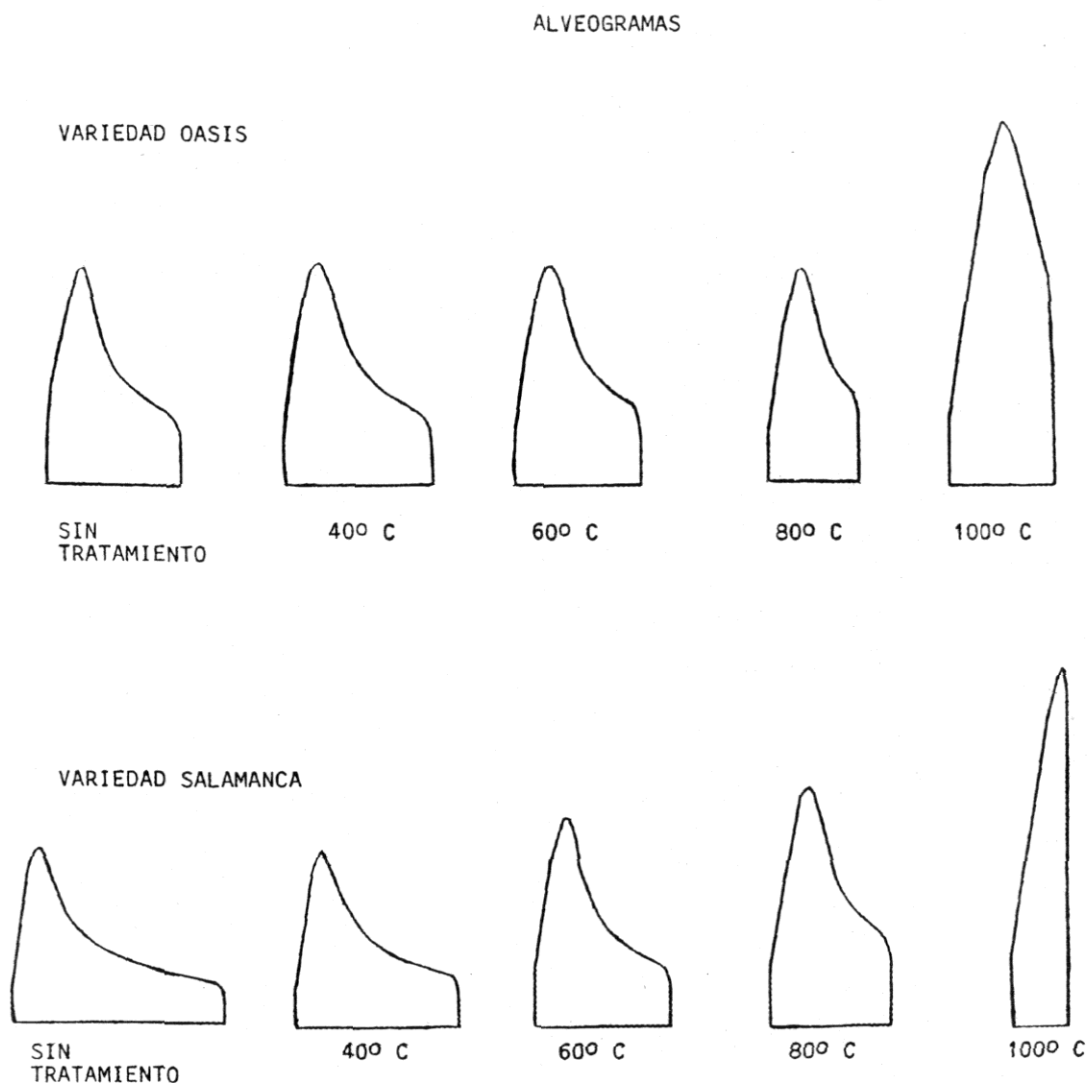


Figura 21 Alveogramas trigo variedad Oasis y Salamanca

Los cambios en las propiedades reológicas determinadas con el Alveógrafo Chopin mostraron la disminución en calidad en el gluten debido al tratamiento térmico (fig 21). Los alveogramas con mejores características panificables correspondieron a los tratamientos a bajas temperaturas para el trigo de la variedad Oasis con gluten fuerte. La

fuerza (W) disminuyó gradualmente con el aumento de temperatura para 100 °C se presentó un aumento de este valor donde la masa se tornó muy tenaz y poco extensible. Comparando los resultados de las dos variedades de trigos sometidas a procesamiento de secado y de los testigos, es evidente una acentuada alteración de las propiedades reológicas. Schoefield *et al.* (1983) Jeanjean *et al.* (1980) y Weegels *et al.* (1994) indicaron que la desnaturalización térmica del gluten produce pérdida estructural de sus proteínas, lo que ocasiona un entrecruzamiento de sus enlaces disulfuro, que hacen a la masa de trigo más tenaz.

6.2.1.4.4. Mixografo.- El tiempo de mezclado medido con el mixógrafo de Swanson resulto con valores ligeramente mayores para la variedad Oasis de gluten fuerte, con mayor tolerancia al mezclado que la variedad Salamanca de gluten débil y menos resistente al mezclado (tabla 45) Los valores del tiempo de mezclado de las masas presentaron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre variedades y temperaturas (tabla 45). En general las dos variedades de trigo presentaron aumento del tiempo de amasado proporcional al tratamiento térmico.

Tabla 45 Características reológicas de las masas de trigo medidas con el mixografo de Swanson respecto a variedad de trigo

Variedad	⁵tm(min)
Oasis	4.273 ^a
Salamanca	3.160 ^b

tiempo de mezclado. Medias con el mismo índice no son diferentes estadísticamente ($p < 0.05$).

Tabla 46 Características reológicas de las masas de trigo medidas con el mixógrafo Swanson respecto a las temperaturas de secado.

	Salamanca	Oasis
temperatura	⁵tm(min)	⁵tm(min)
Control	3.5 ^d	2.4 ^d
40°C	3.4 ^d	2.2 ^d
60°C	4.0 ^c	3.0 ^c
80°C	4.5 ^b	4.0 ^b
100°C	6.0 ^a	5.2 ^a

tiempo de mezclado. Medias con el mismo índice no son diferentes estadísticamente ($p < 0.05$). Solo para cada variedad pero no entre variedades

Los mixogramas de las muestras de ambas variedades de trigo que fueron dañadas por el tratamiento térmico se identificaron al medir el tiempo de mezclado y el pico que marca el desarrollo de la masa que se fue desplazando hacia adelante en comparación con el testigo. La figura. 22 muestra las curvas alargadas que se representan después de hidratarse la masa y la falta de un pico definido después de 6 min de mezclado, siendo más largas y con un achatamiento del pico de las curvas. Los trigos sometidos a temperatura de 100°C proporcionaron mixogramas atípicos con alturas mixográficas muy bajas⁴ y curvas más largas, con achatamiento o falta de un pico máximo definido, indicativo de una pobre consistencia de la masa. Por medio del mixógrafo se observaron cambios en las propiedades del mezclado de las masas de trigos dañadas por calor que pueden ser relacionadas directamente con grado de desnaturalización del gluten (estimando por cambios en rendimiento de gluten y por cambios en el volumen del pan). Finney *et al.* (1962) y Preston *et al.* (1989) encontraron para trigos Canadienses que el gluten del trigo sometido a un proceso drástico de secado se hace mas duro y tenaz provocando que el tiempo de mezclado de las masas aumente, reportaron cambios en las propiedades del mezclado de las masas dañadas por calor relacionadas con el grado de desnaturalización del gluten. Pomeranz (1988) señaló que la determinación de las características físicas de las masas es importante ya que están relacionadas con la calidad y aptitud panadera de las harinas que conforman las bases para la comercialización de las variedades de trigo de acuerdo a la calidad del gluten. Ghaly y Shuderland, (1984) encontraron la misma tendencia en trigos Australiano. Por otro lado Preston *et al.* (1989) concluyeron que el mixógrafo es un instrumento con sensibilidad para identificar daño térmico en trigo, además de ser un método de fácil realización para medir el efecto de la temperatura sobre la calidad del trigo. Este procedimiento mostró la diferencia entre los niveles de daño causado por calor cuando las muestras se compararon con un testigo. La prueba para medir las propiedades físicas de la masa utilizando el mixógrafo de Swanson fue ligeramente más rápida que la prueba que utiliza el farinógrafo. Pomeranz (1991) señaló que las proteínas del gluten pueden unirse formando una red en base al contenido y características de sus subunidades, siendo la

fuerza de la red la que establece las diferencias entre las propiedades fisicoquímicas de las masas de una variedad a otra así como sus características panaderas.

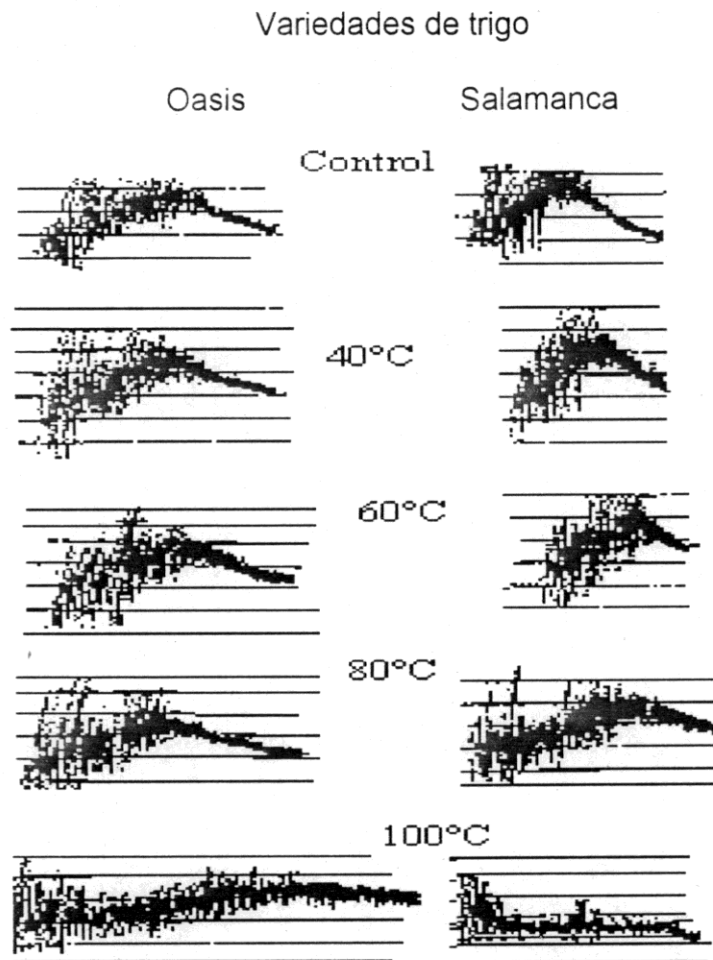


Fig.22: Mixogramas trigo variedad Oasis y Salamanca

Por otro lado diversos investigadores Jeanjean *et al*, 1980; Kobrehel *et al.*, 1991; Weegels *et al.*, 1994 y Strecker *et al.*, 1995 propusieron que las modificaciones en las propiedades físicas de las masas de trigos, sometido a tratamiento térmico se debe principalmente a que, las albúminas, globulinas y gliadinas al desnaturalizarse pueden interactuar entre sí o con fracciones de glutenina, uniéndose o agregándose por enlaces hidrofóbicos así como por enlaces disulfuro, producidos principalmente durante el desdoblamiento de las proteínas del gluten. Por lo tanto las proteínas al modificarse

forman nuevos complejos proteicos de alto peso molecular que influyen en el comportamiento reológico de las masas.

6.2.1.5. Volumen del pan.- La variedad de trigo suave Salamanca mostró volúmenes de la hogaza de pan menores, en comparación con los obtenidos para la variedad fuerte Oasis (tabla 47) El análisis estadístico señala para el volumen del pan diferencias significativas ($p < 0.05$) entre variedades y temperaturas.

Tabla 47 Volumen del pan respecto a variedad de trigo.

Variedad	⁶ v (cm³)
Oasis	645 ^a
Salamanca	536 ^b

⁶volumen pan. Medias con el mismo índice no son diferentes estadísticamente ($p < 0.05$).

La tabla 48 muestra en los panes elaborados con trigos secados a temperatura de 40 y 60 °C para ambas variedades, volúmenes iguales o ligeramente superiores a los panes testigo (correspondiente al aumento del área bajo la curva obtenida por los extensogramas) con buen aspecto exterior. Mientras que a 80 y 100°C los volúmenes fueron significativamente menores con superficie externa agrietada y características de textura y miga deficiente en comparación con las características del pan testigo.

Tabla 48 Volumen del pan respecto a las temperaturas de secado.

	Salamanca	Oasis
temperatura	⁷v(cm³)	⁷v(cm³)
control	600 ^b	675 ^b
40°C	620 ^a	700 ^a
60°C	600 ^b	680 ^b
80°C	560 ^c	625 ^c
100°C	300 ^d	440 ^d

⁷volumen pan. Medias con el mismo índice no son diferentes estadísticamente ($p < 0.05$). Solo para cada variedad pero no entre variedades

Según Kent (1987) es posible observar un ligero aumento del volumen del pan con respecto al trigo control debido a la inactivación de enzimas proteolíticas, cosa que ocurre entre los 55 y 60°C. En el caso de los panes obtenidos con trigos tratados a

100°C el volumen del pan resultó menor comparado con el testigo con superficie externa agrietada y aspecto interno deficiente, denotando disminución de la capacidad de fermentación de las harinas. La variedad de trigo Salamanca secado a 100°C presentó una mayor disminución del volumen de la hogaza, simultáneamente con un deterioro en la apariencia interna y externa del pan en comparación con la hogaza testigo. Internamente la textura y grano fue grueso externamente la corteza desgarrada y muy compacta, con total disminución de la capacidad fermentativa. La figura 23 muestra una reducción progresiva de las hogazas de pan directamente relacionados con la temperatura de secado a la cual fue sometido el trigo con valores mayores para la variedad Oasis.

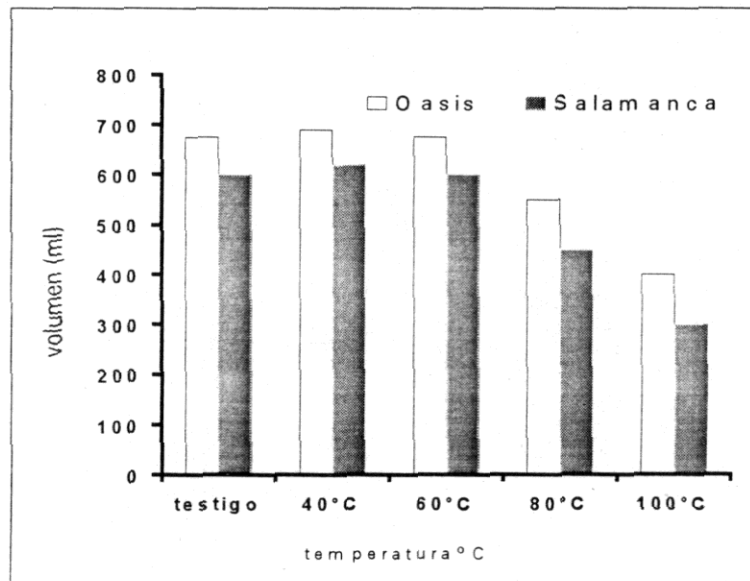


Figura 23 Volumen de pan trigo variedad Oasis y Salamanca

Booth *et al.* (1980), Schofield *et al.* (1983), Luano y Añón (1987), Jeanjean *et al.* (1980). señalaron que el daño por temperatura causa la desnaturalización térmica de las proteínas del trigo especialmente la glutenina y causa la reducción de la calidad panadera de la harina. La comparación de muestras antes y después del secado indican una clara proporción del daño inducido por calor como lo señalaron Ghaly *et al.* (1973) y

Tosi *et al.* (1982) al realizar el secado de trigo cosechado con alto contenido de humedad y trigo manualmente humedecido mostraron que no hubo diferencia significativa en la calidad del trigo debida al humedecimiento manual del grano. Las muestras de trigo sometidas a tratamiento térmico mostraron cambios detrimentales en relación directa con el aumento de temperatura medidos principalmente por la disminución del gluten, la extensibilidad de las masas y el volumen del pan. Se seleccionaron las pruebas para la siguiente experimentación.

6.2.2. Segundo bloque experimental.

En este bloque se determina la calidad de las dos variedades de trigo con tres diferentes contenidos de humedad inicial (17, 25, y 37%) secadas por lecho fluidizado a 40, 60, 80 y 100°C durante 60 min en todos los casos. Las pruebas que se realizaron a los granos y sus harinas.

6.2.2.1. Pruebas físicas

6.2.2.1.1. Peso hectolítrico e índice de dureza del grano- Igual que en el primer bloque experimental el valor medio del peso hectolítrico resultó mayor para la variedad de trigo Oasis y menor para la Salamanca.

Tabla 49 Peso hectolítrico e índice de dureza del grano respecto a la variedad, humedad inicial del grano y temperatura de secado

Variedad	ph	ld (%)
Oasis	78.64 ^a	43.68 ^b
Salamanca	74.09 ^b	59.10 ^a
Temperatura	ph	ld (%)
Control	79.87 ^a	48.53 ^c
40°C	77.21 ^c	54.23 ^a
60°C	76.21 ^d	54.40 ^a
80°C	78.93 ^b	52.18 ^b
100°C	72.58 ^e	47.56 ^c
humedad inicial	ph	ld%
17%	76.89 ^b	51.21 ^a
25%	77.04 ^a	51.26 ^a
37%	75.14 ^c	51.76 ^b

ph=peso hectolítrico (kg/hl), ld=dureza (g/100) Medias con mismo índice no son diferentes estadísticamente p<0.05

En la tabla 49 se observa diferencia significativa para el peso hectolítrico y la dureza del grano entre variedades, contenido de humedad del grano y temperaturas. El índice de dureza solo mostró diferencias significativas para 37% de humedad. El índice de dureza tuvo valores mayores para el trigo de la variedad Salamanca con textura suave y menores para el trigo Oasis con textura dura. Pomeranz (1988) señaló que entre más densos los granos, tienen mejor probabilidad de soportar el tratamiento térmico de secado. La tabla 50 muestran que el peso hectolítrico de ambas variedades de trigo con tres diferentes contenidos de humedad inicial y secado a las diferentes temperaturas disminuyo con respecto al trigo control.

Tabla 50 Peso hectolítrico respecto al contenido de humedad inicial del grano y a las temperatura de secado

	Oasis			Salamanca		
<i>humedad inicial</i>	17%	25%	37%	17%	25%	37%
temperatura control	ph	ph	ph	ph	ph	ph
control	81.0 ^a	80.9 ^a	80.9 ^a	78,8 ^a	78,8 ^a	78,8 ^a
40	79.5 ^b	79.3 ^b	79.8 ^b	77,7 ^b	73,7 ^d	73.3 ^b
60	78.1 ^c	78.4 ^c	78.0 ^c	77,0 ^b	75,4 ^b	70.4 ^c
80	78.2 ^c	77.7 ^d	78.4 ^c	77,2 ^b	74,8 ^c	69.3 ^d
100	78.5 ^c	77.6 ^d	73.4 ^d	63,2 ^c	73,7 ^d	69,1 ^d

ph=peso hectolítrico (kg/hl), Medias con mismo índice no son diferentes estadísticamente $p < 0.05$ Solo para cada variedad pero no entre variedades

La tabla 51 muestra que en relación a la humedad del grano y temperatura de secado se obtuvieron valores del índice de dureza del grano para la variedad Oasis mayores que el trigo control. En cambio para la variedad Salamanca los valores del trigo con diferentes contenidos de humedad secado a 100°C resultaron menores en comparación con el trigo control. En general tanto el peso hectolítrico como el índice de dureza del grano con diferentes contenidos de humedad presentaron un comportamiento muy disperso que no indica el grado del daño causado al trigo aún que las temperaturas de secado modificaron las características físicas de los granos en comparación con el trigo testigo. La humedad final del trigo es de gran importancia para que el grano en el almacenamiento no sufra modificaciones indeseables.

Tabla 51 Índice de dureza del grano respecto a la humedad inicial del grano y las temperatura de secado

<i>humedad inicial</i>	Oasis			Salamanca		
	17%	25%	37%	17%	25%	37%
temperatura control	Id	Id	Id	Id	Id	Id
40	38,2 ^d	38,3 ^e	38.2 ^e	57,5 ^d	59,5 ^a	59,5 ^c
60	47,5 ^a	45.0 ^c	47.7 ^a	60,0 ^b	59.1 ^a	66,1 ^a
80	47.5 ^a	48.7 ^a	44.7 ^b	61,5 ^a	59.8 ^a	64,5 ^b
100	46,0 ^b	47.0 ^b	42.2 ^c	59,5 ^c	59,6 ^a	58,8 ^d
	41,0 ^c	42.2 ^d	41.0 ^d	53,4 ^e	53,4 ^b	54,4 ^e

Id=dureza (%), Medias con mismo índice no son diferentes estadísticamente $p < 0.05$ Solo para cada variedad pero no entre variedades

Tanto en la primera como en la segunda parte experimental de este trabajo la humedad final que el grano alcanzó en ambas variedades de trigo fue de entre 25 y 7% influenciando principalmente las propiedades físicas del grano. Fellow (1994) reportó que las características físicas de los granos pueden ser modificadas por la humedad y las condiciones de secado industrial, provocando contracción y/o expansión del mismo como consecuencia del aumento de la concentración de sales y la desorción de agua, así como la destrucción de geles (pectinas y almidones) y la modificación de la presión osmótica, causada por la destrucción de las membranas celulares. Por su parte Becker y Sallans (1960), Ghaly y Sutherland (1984) indicaron que trigos de diferentes variedades (con diferente dureza, contenido de proteína) y contenido de humedad inicial al ser sometidos a secado pueden comportarse de manera diferente. No obstante que la humedad final del grano puede afectar las propiedades físicas del grano, no se consideró determinarla como otro factor del proceso de secado, tomando en cuenta solo la influencia de la humedad inicial del grano de acuerdo a Ghaly y Taylor (1982) y Giner *et al.* (1991). Lo anterior fue debido a que el grano después del secado se sometió inmediatamente a proceso de molienda obteniéndose harinas con humedades iguales o menores del 14%. Por otro lado el trigo también se secó hasta alcanzar humedades finales aptas para que el grano no sufriera modificaciones bioquímicas ni microbiológicas, reportándose resultados similares tanto para el trigo como para sus harinas en las tres experimentaciones efectuadas.

6.2.2.2. Calidad química de harinas de trigo

6.2.2.2.1. Contenido de proteína.- El contenido de proteína total de los granos igual que en el experimento anterior, solo presentó cambios significativos ($p < 0.05$) entre variedades, mostrando que el grano no experimentó pérdidas de material nitrogenado por efecto de temperatura ni por la humedad inicial del grano

Tabla 52 Porcentaje de proteína de las harinas respecto a variedad, humedad inicial del grano y temperatura de secado

<i>variedad</i>	<i>(%) Proteína</i>
Oasis	9.26 ^a
Salamanca	8.62 ^b
temperatura	
control	8.95 ^a
40°C	8.85 ^a
60°C	9.0 ^a
80°C	8.95 ^a
100°C	8.95 ^a
humedad inicial	
17%	8.94 ^a
25%	8.94 ^a
37%	8.94 ^a

p= % proteína (g/100), medias con mismo índice no son diferentes estadísticamente $p < 0.05$

Tabla 53 Porcentaje de proteína de las harinas respecto a la humedad del grano y temperatura de secado

<i>humedad inicial</i>	<i>Oasis</i>			<i>Salamanca</i>		
	<i>17%</i>	<i>25%</i>	<i>37%</i>	<i>17%</i>	<i>25%</i>	<i>37%</i>
temperatura						
	P(%)	P(%)	P(%)	P(%)	P(%)	P(%)
control	9,3 ^a	9,3 ^a	9,3 ^a	8,6 ^a	8,6 ^a	8,6 ^a
40	9,0 ^a	9,0 ^a	9,0 ^a	8,7 ^a	8,7 ^a	8,7 ^a
60	9,2 ^a	9,2 ^a	9,2 ^a	8,8 ^a	8,8 ^a	8,8 ^a
80	9,4 ^a	9,4 ^a	9,4 ^a	8,5 ^a	8,5 ^a	8,5 ^a
100°C	9,4 ^a	9,4 ^a	9,4 ^a	8,5 ^a	8,5 ^a	8,5 ^a

p= proteína total (%) medias con mismo índice no son diferentes estadísticamente $p < 0.05$ Solo para cada variedad pero no entre variedades

6.2.2.3. Características reológicas de calidad de las masas de trigo:

6.2.2.3.1. Alveografo.- Los parámetros medidos a las masas de trigo con el alveografo de Chopin y con el mixógrafo de Swanson presentaron cambios significativos ($p < 0.05$)

entre variedades, temperaturas y humedades. Como en el primer bloque experimental la tabla 54 muestra valores de tenacidad, de fuerza de la masa y del tiempo

Tabla 54 Características reológicas de las masas de trigo medidas con el alveógrafo Chopin respecto a l contenido de humedad del grano y temperatura de secado

Variedad	<i>l</i>	<i>t</i>	<i>t/l</i>	<i>W</i>
Oasis	38.4 ^b	126.4 ^a	3.78 ^a	220 ^a
Salamanca	41.3 ^a	96.7 ^b	2.9 ^b	129.3 ^b
Temperatura				
Control	49.6 ^a	92.2 ^e	1.8 ^d	163 ^c
40°C	49.3 ^a	63.4 ^d	2.14 ^c	171 ^d
60°C	44.6 ^b	110.1 ^c	2.63 ^c	168 ^c
80°C	36.6 ^c	112.6 ^b	3.14 ^b	179.8 ^b
100°C	19 ^d	137 ^a	7.21 ^a	191 ^a
humedad inicial				
17%	39.89 ^a	111.5 ^c	3.21 ^c	169.2 ^c
25%	40.0 ^a	112.4 ^b	3.36 ^b	174.6 ^b
37%	38.4 ^b	113.6 ^a	3.47 ^a	180.3 ^a

¹ extensibilidad, ² tenacidad, ³ relación tenacidad/extensibilidad, ⁴ fuerza de la masa, (ergs x 10³ /g de masa). Medias con el mismo índice no son diferentes estadísticamente (p<0.05).

de mezclado más altos para la variedad Oasis con gluten fuerte (de mayor fuerza y mas resistencia al mezclado) que para la variedad Salamanca con gluten débil.

Los valores de la tabla 55 medidos con el alveógrafo de Chopin presentaron la misma tendencia que mostraron los resultados obtenidos en la primera experimentación mostrando aumento de tenacidad y disminución de la extensibilidad como lo refleja la relación tenacidad/extensibilidad, con valores más altos para la variedad Oasis de gluten de mayor fuerza y más resistencia a la extensión, que para la variedad Salamanca de gluten débil y menor resistencia al estiramiento. Ambas variedades de trigo presentaron aumento de la relación tenacidad extensibilidad en relación directa al aumento de temperatura y a la humedad del grano, pero con valores muy semejantes para 40 y 60°C. Las muestras de masas dañadas, a mayor temperatura y humedad inicial del grano modificaron su resistencia al estiramiento (fuerza W), siendo también estos valores mayores para la variedad Oasis que para la variedad Salamanca, comparadas con la muestra testigo

Tabla 55 Características reológicas de las masas de trigo medidas con el alveógrafo Chopin respecto a la humedad inicial y temperatura de secado

Variedad Oasis												
	17				25				37			
	<i>I</i>	<i>T</i>	<i>t/l</i>	<i>W</i>	<i>I</i>	<i>T</i>	<i>t/l</i>	<i>w</i>	<i>I</i>	<i>t</i>	<i>t/l</i>	<i>W</i>
T°C												
control	46 ^b	110 ^e	2.3 ^c	207 ^d	45 ^c	105 ^e	2.3 ^e	208 ^d	46 ^b	115 ^e	2.1 ^e	207 ^e
40	48 ^a	120 ^d	2.5 ^c	202 ^e	49 ^a	123 ^d	2.5 ^d	217 ^c	47 ^a	125 ^d	2.6 ^d	220 ^s
60	45 ^c	128 ^c	2.8 ^c	208 ^c	46 ^b	126 ^c	2.7 ^c	206 ^e	44 ^c	127 ^c	2.8 ^c	210 ^d
80	36 ^d	130 ^b	3.7 ^b	220 ^b	33 ^d	130 ^b	3.9 ^b	220 ^b	35 ^d	130 ^b	3.7 ^b	231 ^b
100	18 ^e	140 ^a	7.8 ^a	231 ^a	19 ^e	142 ^a	7.4 ^a	239 ^a	19 ^e	145 ^a	7.6 ^a	257 ^a

Variedad Salamanca												
	17				25				37			
	¹ <i>I</i>	² <i>t</i>	³ <i>t/l</i>	<i>w</i>	¹ <i>I</i>	² <i>t</i>	³ <i>t/l</i>	⁴ <i>w</i>	¹ <i>I</i>	² <i>t</i>	³ <i>t/l</i>	⁴ <i>w</i>
T°C												
control	54 ^b	72 ^e	1.3 ^e	119 ^c	53 ^a	75 ^e	1.4 ^e	119 ^e	54 ^a	75 ^e	1.3 ^e	119 ^e
40°C	56 ^a	86 ^d	1.5 ^d	120 ^b	50 ^b	90 ^d	1.8 ^d	121 ^d	46 ^b	90 ^d	1.9 ^d	128 ^d
60°C	48 ^c	90 ^b	1.8 ^c	119 ^c	45 ^c	95 ^c	2.1 ^c	132 ^c	40 ^c	95 ^c	2.3 ^c	135 ^c
80°C	41 ^d	89 ^c	2.1 ^b	123 ^b	40 ^d	98 ^b	2.5 ^b	139 ^b	35 ^d	99 ^b	2.82 ^b	146 ^b
100°C	20 ^e	120 ^a	6.0 ^a	125 ^a	20 ^e	140 ^a	7.0 ^a	145 ^a	18 ^e	135 ^a	7.5 ^a	150 ^a

¹extensibilidad, ²tenacidad, ³relación tenacidad/extensibilidad, ⁴ fuerza de la masa, (ergs x 10³ /g de masa). Medias con el mismo índice no son diferentes estadísticamente (p<0.05). Solo para cada variedad pero no entre variedades

Las determinaciones con el alveógrafo de Chopin mostraron cambios en las propiedades reológicas de las masas en función de la temperatura de secado así como con el contenido de humedad del grano concordando con el trabajo de Tosi *et al* (1986).

6.2.2.3.2. Mixografo. - El tiempo de mezclado medido con el mixógrafo de Swanson para las dos variedades tabla 56, presentó un aumento del tiempo de mezclado proporcional con el tratamiento térmico. Las masas de los trigos tratados a 40 y 60°C presentaron valores medios para el tiempo de mezclado muy cercanos a los del control, indicando que a estas temperaturas las masas no presentaron cambios reológicos detrimentales debidos al proceso térmico. Las muestras dañadas a temperaturas de 80 y 100°C, y con humedad del 37% indicaron mayor disminución del tiempo de mezclado en comparación con la muestra testigo.

Tabla 56 Tiempo de mezclado de las masas de trigo medidas con el mixógrafo de Swanson respecto a l contenido de humedad del grano y temperatura de secado

Variedad	tm
Oasis	4.37 ^a
Salamanca	3.45 ^b
Temperatura	
Control	3,01 ^e
40°C	3,05 ^d
60°C	3,7 ^c
80°C	4,4 ^b
100°C	5.3 ^a
humedad inicial	
17%	3,68 ^b
25%	3,89 ^a
37%	4.15 ^c

tm=tiempo de mezclado(min) medias con mismo índice no son diferentes estadísticamente p<0.05

Con el mixógrafo de Swanson se pudieron observar claramente los cambios reológicos que sufrieron las masas de los trigos con diversos contenidos de humedad y diferentes temperaturas de secados.

Tabla 57 Tiempo de mezclado medido a las masas de trigo con el mixógrafo de Swanson respecto a la humedad inicial y temperatura de secado

Humedad	Oasis			salamanca		
	17%	25%	37%	17%	25%	37%
	tm	tm	tm	tm	tm	tm
temperatura	3.6 ^d	3.6 ^d	3.7 ^e	2.4 ^d	2.4 ^e	2.4 ^e
40	3.3 ^e	3.5 ^e	3.8 ^d	2.2 ^e	2.5 ^d	3.0 ^d
60	4.1 ^c	4.3 ^c	4.5 ^c	2.9 ^c	3.0 ^c	3.7 ^c
80	4.5 ^b	4.6 ^b	4.8 ^b	4,0 ^b	4.2 ^b	4.4 ^b
100	5.5 ^a	5.8 ^a	6.0 ^a	4.5 ^a	5.0 ^a	5.2 ^a

tm= tiempo mezclado (min), Medias con mismo índice no son diferentes estadísticamente p<0.05 Solo para cada variedad pero no entre variedades

6.2.2.4. Prueba de panificación.- Los resultados fueron similares a los obtenidos en el primer experimento observándose diferencia significativa ($p<0.05$) entre variedades tiempos y humedades (tabla 58). La variedad de trigo suave Salamanca con menor porcentaje de proteína total fue más afectada por el tratamiento térmico con un volumen del pan menor que la variedad dura Oasis con mayor porcentaje de proteína total y mayor volumen del pan. En general el pan presentó una progresiva reducción del volumen directamente proporcional con el aumento de temperatura y con el contenido de

humedad del grano. Los resultados (tabla 59) para los volúmenes de los panes obtenidos con trigos con los tres contenidos de humedad y secados a 40 y 60°C fueron ligeramente mayores que el volumen del pan control.

Tabla 58 Volumen del pan para diferentes variedades de trigo, humedades iniciales y temperaturas de secado.

Variedades	Volumen
Oasis	575 ^a
Salamanca	523 ^b
temperaturas	
control	613 ^c
40°C	664 ^a
60°C	630 ^b
80°C	489 ^d
100°C	348 ^e
humedad inicial	
17%	563.3 ^a
25%	550.1 ^b
37%	533.9 ^c

v=volumen pan (cm³) Medias con mismo índice no son diferentes estadísticamente p<0.05

Tabla 59 Efecto en el volumen del pan de la humedad inicial y la temperatura de secado del trigo

humedad	Oasis			salamanca		
	17%	25%	37%	17%	25%	37%
temperaturas°C	V	V	V	V	V	V
	619 ^c	619 ^c	620 ^c	605 ^c	605 ^c	610 ^b
40	710 ^a	690 ^a	659 ^a	655 ^a	640 ^a	630 ^a
60	660 ^b	640 ^b	630 ^b	625 ^b	620 ^b	610 ^b
80	570 ^d	550 ^d	510 ^d	460 ^d	437 ^d	410 ^c
100	399 ^e	390 ^e	360 ^e	330 ^e	310 ^e	300 ^d

v=volumen pan (cm³) Medias con mismo índice no son diferentes estadísticamente p<0.05Solo para cada variedad pero no entre variedades

En contraste los volúmenes de los panes obtenidos con trigos secados a 80 y 100°C fueron menores presentando una superficie externa agrietada y aspecto interno deficiente, con poca o nula capacidad fermentativa de las harinas. Los panes obtenidos son pesados, de masa compacta, corteza gomosa y húmeda. El efecto del contenido inicial de humedad del grano sobre el volumen del pan fue significativo con valores mayores para 17% que para 37% donde el volumen de la hogaza disminuyó al aumentar

la humedad inicial. Los volúmenes del pan del trigo con mayor humedad (37%) fueron ligeramente menores que el del control. Tosi *et al*, (1982), indicaron que a mayor nivel de humedad, menor debe ser la temperatura de secado del trigo, ya que el grano puede ser mas sensible al daño por tratamiento térmico cuando tiene mayor contenido de humedad.

6.2.3. Tercer bloque experimental

En esta parte del trabajo las variedades de trigo se ajustaron a humedades iniciales del 20 y 15 % (b. s). Las temperaturas de entrada de aire (40, 60, 70, 80, y 100°C) y los diferentes períodos de tiempo de secado se fijaron hasta que la humedad final del grano llegara a ser de entre 11 y 8 % (b. s). Para ambas variedades de trigo se tomaron muestras de trigo a dos diferentes tiempos como sigue; a 40°C, 240 y 180 min, a 60°C 140 y 90 min, a 70°C 80 y 60 min, a 80°C 50 y 30 min y a 100°C 30 y 20 min. Los análisis que se efectuaron a los granos y sus harinas se seleccionaron en base a resultados anteriores

6.2.3.1. Propiedades físicas de los granos.- También las propiedades físicas del grano medidas (tabla 60) mostraron valores del peso hectolítrico mayores para la variedad Oasis y los valores de índice de dureza menores. Ambas variedades presentaron cambios significativos ($p < 0.05$) entre variedades, tiempos y temperaturas de secado. Los resultados para las dos determinaciones físicas efectuadas a ambas variedades de trigo fueron menores que el control correspondiente. La temperatura de secado ejerció efecto sobre la textura de los granos, provocando cambios físicos en la superficie del grano pero el contenido inicial de humedad del grano no (tabla 61). En general igual que en las primeras experimentaciones como ya se ha mencionado las propiedades físicas de los granos mostraron valores muy dispersos menores que el control sin tener relación con el contenido de humedad. Una de las principales causas de alteración de la calidad física de los granos deshidratados reside en las modificaciones que éstos provocan en su textura. La contracción del grano, producida por el secado con aire caliente, es la causa de que el material se deforme y cambie su estructura, los efectos de la contracción, evidenciados por deformación o endurecimiento de la superficie puede minimizarse controlando el tiempo y la temperatura de secado evitando que se produzca un gradiente

Tabla 60 Peso hectolítrico e índice de dureza del grano respecto a la variedad, humedad inicial del grano, tiempo y temperatura de secado

<i>variedad</i>	<i>ph</i>	<i>ld</i>
Oasis	78.69 ^a	40.37 ^b
Salamanca	76.68 ^b	52.7 ^a
humedad inicial %	Ph	ld
20%	77.8 ^a	46.31 ^a
15%	77.7 ^a	46.81 ^a
temperatura °C		
Control	80.5 ^a	46.56 ^b
40°C	77.8 ^b	47.65 ^a
60°C	77.8 ^b	47.46 ^a
70°C	77.97 ^b	46.97 ^b
80°C	77.16 ^b	45.85 ^c
100°C	76.21 ^c	44.8 ^d
tiempo (min)		
Control	80.5 ^a	46.56 ^c
20	76.3 ^d	44.9 ^e
30	77.1 ^c	45.2 ^d
50	77.1 ^c	45.6 ^d
60	78.1 ^b	47.5 ^b
80	77.9 ^c	46.4 ^c
90	78.1 ^b	48.1 ^a
140	77.4 ^c	46.7 ^c
180	77.4 ^c	48.3 ^a
240	78.3 ^c	47.1 ^b

ph=peso hectolítrico (kg/hl), ld=dureza (g/100), medias con mismo índice no son diferentes estadísticamente p<0.05

Tabla 61 Variación del peso hectolítrico e índice de dureza respecto a la humedad inicial del grano tiempo y temperatura de secado

		<i>Oasis</i>				<i>Salamanca</i>			
<i>% humedad inicial</i>		<i>15%h</i>		<i>20%h</i>		<i>15%h</i>		<i>20%h</i>	
<i>temperatura-.</i>	<i>tiempo.</i>	<i>ph</i>	<i>ld</i>	<i>ph</i>	<i>ld</i>	<i>ph</i>	<i>ld</i>	<i>ph</i>	<i>ld</i>
<i>°C</i>	<i>(min)</i>								
Control		82.7 ^a	40.0 ^d	82.5 ^a	39.8 ^d	78.7 ^a	54.0 ^a	78.3 ^a	54.0 ^a
40	240	79.0 ^b	40.7 ^d	79.0 ^b	41.0 ^b	77.9 ^b	53.3 ^b	77.3 ^b	53.0 ^b
40	180	78.3 ^c	43.3 ^a	78.0 ^c	42.3 ^a	77.4 ^b	53.9 ^b	76.0 ^c	53.7 ^b
60	140	79.0 ^b	41.3 ^c	78.0 ^c	40.7 ^c	76.9 ^c	53.0 ^b	76.0 ^c	52.0 ^c
60	90	78.7 ^c	43.0 ^a	79.0 ^b	42.0 ^a	77.9 ^b	53.9 ^b	76.9 ^c	53.8 ^d
70	80	79.7 ^b	40.0 ^d	79.0 ^b	41.0 ^b	76.9 ^c	52.7 ^c	76.0 ^c	52.0 ^c
70	60	78.9 ^c	42.6 ^b	78.7 ^c	40.3 ^c	77.9 ^b	53.9 ^b	76.7 ^c	53.3 ^d
80	50	78.0 ^c	39.6 ^e	79.6 ^b	39.0 ^d	75.1 ^d	52.9 ^c	75.9 ^d	51.0 ^e
80	30	77.5 ^d	40.5 ^d	79.5 ^b	39.5 ^d	76.3 ^c	52.0 ^c	75.3 ^d	52.3 ^c
100	30	76.3 ^e	37.7 ^f	77.3 ^d	38.7 ^e	75.7 ^d	52.3 ^c	75.6 ^d	50.7 ^f
100	20	76.0 ^e	37.0 ^f	76.6 ^e	38.7 ^e	76.8 ^c	52.9 ^c	75.9 ^d	51.0 ^e

ph=peso hectolítrico (kg/hl), ld=dureza (g/100) 05.Solo para cada variedad pero no entre variedades

de humedad elevado entre el contenido en agua de la superficie y el interior del grano (Tosi *et al.*, 1986).

6.2.3.2.Solubilidad en Na Cl de la proteína de las harinas de trigo.- La tabla 62 muestra que la variedad, la temperatura y tiempo de secado mostraron efecto significativo ($p < 0.05$) sobre la solubilidad en solución de NaCl al 2% de las proteínas determinada a las harinas de trigo. Los valores de solubilidad de las proteínas fueron disminuyendo directamente con el aumento de la temperatura, como resultado de la desnaturalización de las proteínas principalmente las del gluten. En cambio el contenido de humedad del grano no afectó la solubilidad de las proteínas de ambas variedades de trigo. Los valores de solubilidad que resultaron más cercanos al control fueron los trigos secados a 40°C/ 180 min, 60°C/ 90 min y 70°C/ 60 min indicando menos cambios en la calidad del trigo sometido a tratamiento térmico

Tabla 62 Variación de la solubilidad en NaCl de proteína en harinas respecto a la variedad, humedad inicial tiempos y temperaturas de secado

Variedad	* solubilidad proteina (mg/ml)
Oasis	0.216 ^a
Salamanca	0.163 ^b
humedad inicial	
20%	0.18981 ^a
15%	0.19004 ^a
temperatura	
Control	0.214 ^a
40°C	0.207 ^b
60°C	0.2067 ^b
70°C	0.2065 ^b
80°C	0.1690 ^c
100°C	0.1480 ^d
Tiempo	
Control	0.214 ^a
20	0.148 ^e
30	0.158 ^d
50	0.169 ^c
60	0.212 ^a
80	0.201 ^b
90	0.212 ^a
140	0.201 ^b
180	0.212 ^a
240	0.202 ^b

Medias con mismo indice no son diferentes estadísticamente $p < 0.05$

Los tratamientos más drásticos 80°C/ 50 y 30 min, 100°C 30 y 20 min mostraron valores de solubilidad más bajos con harinas que sufrieron mayores cambios debidos al tratamiento térmico. Schofield *et al* (1983) encontraron que durante el tratamiento térmico de las proteínas del trigo pueden generarse reacciones moleculares de intercambio disulfuro-sulfhidrilo debido al desdoblamiento de la proteína provocado la insolubilización de las proteínas en diferentes solventes. De acuerdo a lo reportado por Lupano y Añón (1987) la pérdida de solubilidad de las proteínas en diferentes solventes puede ser resultado de la formación de agregados proteínicos formados durante el secado del trigo que se desarrollan a través de la formación de enlaces covalentes.

Tabla 63 Variación de la solubilidad en NaCl de las proteínas de las harinas respecto a la humedad inicial del grano tiempos y temperatura de secado

	Oasis		Salamanca	
	15% h	20%h	15%h	20%h
Temperatura- tiempo °C (min)	Solubilidad (mg/ml)	Solubilidad (mg/ml)	Solubilidad (mg/ml)	Solubilidad (mg/ml)
Control	0.250 ^a	0.249 ^a	0.178 ^a	0.179 ^a
40 240	0.238 ^c	0.237 ^b	0.165 ^b	0.170 ^a
40 180	0.249 ^b	0.247 ^a	0.176 ^a	0.178 ^a
60 140	0.238 ^c	0.236 ^b	0.166 ^b	0.166 ^b
60 90	0.247 ^b	0.246 ^a	0.177 ^a	0.178 ^a
70 80	0.236 ^c	0.234 ^b	0.166 ^b	0.168 ^b
70 60	0.248 ^b	0.247 ^a	0.177 ^a	0.176 ^a
80 50	0.188 ^d	0.185 ^c	0.152 ^c	0.154 ^c
80 30	0.177 ^e	0.171 ^d	0.163 ^b	0.164 ^b
100 30	0.168 ^f	0.162 ^e	0.132 ^e	0.133 ^e
100 20	0.156 ^g	0.152 ^f	0.141 ^d	0.144 ^d

Medias con mismo índice no son diferentes estadísticamente $p < 0.05$ Solo para cada variedad pero no entre variedades

Los tratamientos térmicos que menos afectaron la solubilidad de las proteínas de ambas variedades de trigo fueron 40°C/180 min, 60°C/90 min y 70°C/60min con valores semejantes al del trigo control correspondiente. El tratamiento drástico afectó con mayor intensidad la solubilidad de las proteínas del trigo concordando con lo reportado por Every (1987) quien propuso medir la pérdida de solubilidad en solución de NaCl al 2% de las proteínas del trigo que fue sometido a tratamiento térmico usando el reactivo de azul

de Coomassie G250 descrito inicialmente por Bradford (1976). Esta determinación donde el desarrollo del color medido a 595 nm depende de la solubilidad de la proteína, mide la pérdida de solubilidad de las proteínas en solución salina del trigo que fue sometido a tratamiento térmico, usando el reactivo colorido azul de Coomassie G-250. Esta es una prueba rápida y reproducible.

6.2.3.3. Mixografo .- La tabla 64 muestra que la variedad, la temperatura y el tiempo de secado mostraron efecto significativo ($p < 0.05$) sobre el tiempo de mezclado medido a las masas de trigo. De la misma forma que en las primeras experimentaciones el tiempo de mezclado de las masas se fue modificando con respecto al aumento de temperatura indicando cambios en las proteínas del gluten.

Tabla 64 Tiempo de mezclado de las masas de trigo medido con mixografo de Swanson respecto a la variedad, humedad inicial tiempo y temperatura de secado

Variedad	*tiempo mezclado
Oasis	4.35 ^a
Salamanca	2.95 ^b
Temperatura	
Control	2.92 ^c
40°C	2.96 ^c
60°C	2.96 ^c
70°C	3.0 ^c
80°C	4.4 ^b
100°C	5.33 ^a
humedad inicial	
20%	3.62 ^a
15%	3.70 ^a
Tiempo	
Control	2.92 ^c
20	5.1 ^a
30	4.9 ^b
50	4.5 ^b
60	2.9 ^d
80	3.15 ^c
90	2.8 ^d
140	3.1 ^c
180	2.6 ^d
240	3.0 ^c

tm=tiempo de mezclado(min) Medias con mismo índice no son diferentes estadísticamente $p < 0.05$

Los valores del tiempo de mezclado para la variedad Oasis señalan mayor fuerza del gluten. La tabla 65 muestra valores del tiempo de mezclado para 40C/180min,60°C/ 90

min, 70°C/60min semejantes a los trigos testigo correspondientes, indicando que la calidad del grano no sufrió cambios debidos por el tratamiento térmico, en cambio los valores mayores del tiempo de mezclado obtenidos a 80 y 100 °C mostraron mayor efecto sobre las propiedades reológicas de las masas de trigo que fue sometido a tratamiento drástico de secado. La desnaturalización térmica del gluten del trigo afectó las proteínas y provocó cambios en las características viscoelásticas de la masa (Jeanjean, et al., 1980).

Tabla 65 Tiempo de mezclado medido con mixografo de Swanson respecto a la humedad inicial del grano, tiempo y temperatura de secado

		Oasis		Salamanca	
		15%	20%	15%	20%
temperatura- °C	tiempo (min)	tm	tm	tm	Tm
control		3.5 ^c	3.5 ^c	2.4 ^c	2.3 ^c
40	240	3.8 ^c	3.7 ^c	2.4 ^c	2.4 ^c
40	180	3.4 ^c	3.3 ^c	2.4 ^c	2.3 ^c
60	140	3.7 ^c	3.6 ^c	2.6 ^c	2.5 ^c
60	90	3.4 ^c	3.4 ^c	2.3 ^c	2.2 ^c
70	80	3.8 ^c	3.7 ^c	2.6 ^c	2.5 ^c
70	60	3.5 ^c	3.4 ^c	2.4 ^c	2.3 ^c
80	50	5.5 ^b	5.5 ^b	3.6 ^b	3.5 ^b
80	30	5.3 ^b	5.2 ^b	3.4 ^b	3.3 ^b
100	30	6.5 ^a	6.4 ^a	4.6 ^a	4.5 ^a
100	20	6.0 ^a	6.0 ^a	4.4 ^a	4.3 ^a

tm=tiempo de mezclado(min) Medias con mismo índice no son diferentes estadísticamente p<0.05 Solo para cada variedad pero no entre variedades

6.2.3.4 Volumen del pan.- Por medio del análisis estadístico se determinó que la variedad, el tiempo y la temperatura de secado mostraron efecto significativo (p<0.05) sobre el volumen del pan (tabla 66). El volumen de la hogaza y las características de la miga del trigo, disminuyeron a temperaturas mayores para ambas variedades de trigo con diferentes humedades. El contenido de humedad del grano no mostro efecto sobre el volumen del pan debido posiblemente a que la diferencia entre humedades fue muy cercana. Los resultados de la tabla 67 señalan que las características panaderas de los granos secados a temperaturas de 40°C/180, 60°C/90min y 70°C/60 min fueron menos afectadas que los trigos secados a 40°C/240 min, 60°C/140 min y 70°C/80 min presentando características similares o ligeramente mejores que el control. En cambio

las características de los granos secados principalmente a 80°C/50 min y 100°C/30 min fueron las más afectadas por el tratamiento térmico con mayor detrimento de la calidad del trigo. La prueba de panificación resultó ser uno de los mejores criterios para juzgar la

Tabla 66 Volumen del pan respecto a la variedad, humedad inicial y tiempo y temperatura de secado

<i>variedad</i>	<i>*volumen pan</i>
Oasis	612 ^a
Salamanca	568 ^b
temperatura	
control	634 ^a
40°C	633 ^a
60°C	636 ^a
70°C	638 ^a
80°C	550 ^b
100°C	471 ^c
humedad inicial	
20%	589 ^a
15%	591 ^a
tiempo	
Control	634. ^b
20	493 ^g
30	507 ^f
50	534 ^e
60	649 ^a
80	627 ^c
90	647 ^a
140	625 ^c
180	646 ^a
240	619 ^d

v=volumen pan (cm³) Medias con mismo índice no son diferentes estadísticamente p<0.05 Solo para cada variedad pero no entre variedades

calidad de las harinas, refiriéndose al daño inducido por calor sobre el trigo como resultado de un tratamiento térmico. Los resultados obtenidos en este bloque experimental indicaron que existe una relación directa del tiempo y temperatura de secado con la disminución del volumen del pan, la solubilidad de las proteínas y el tiempo de mezclado de las masas de trigo (medido con el mixógrafo Swanson) pero el contenido de humedad del grano en este caso no mostró diferencia significativa debido posiblemente a la cercanía entre el contenido de humedad. En general los resultados obtenidos (principalmente con el mixógrafo y la prueba de panificación) mostraron que la

variedad de trigo duro Oasis de textura dura y gluten fuerte con proteína total del 9% resultó con mejores características en panificación que la variedad Salamanca de trigo suave, gluten débil y con proteína total del 8% como era de esperarse debidos a las características inherentes de cada variedad.

Tabla 67 Volúmenes de los panes para cada variedad de trigo respecto a la humedad inicial tiempo y temperatura de secado

<i>Humedad inicial</i>		<i>Oasis</i>		<i>salamanca</i>	
		<i>15%</i>	<i>20%</i>	<i>15%</i>	<i>20%</i>
<i>Temperatura °C</i>	<i>tiempo (min)</i>	<i>volumen</i>	<i>volumen</i>	<i>volumen</i>	<i>volumrn</i>
Control		665 ^b	665 ^b	603 ^b	604 ^b
40	240	650 ^c	648 ^d	590 ^c	589 ^c
40	180	675 ^a	673 ^a	620 ^a	619 ^a
60	140	653 ^c	650 ^c	600 ^b	599 ^c
60	90	674 ^a	672 ^a	623 ^a	622 ^a
70	80	655 ^c	655 ^c	600 ^b	600 ^b
70	60	675 ^a	672 ^a	625 ^a	625 ^a
80	50	525 ^d	524 ^e	545 ^e	545 ^e
80	30	570 ^d	568 ^e	566 ^d	560 ^d
100	30	490 ^e	489 ^f	410 ^g	410 ^g
100	20	510 ^d	509 ^e	479 ^f	474 ^f

v=volumen pan (cm³) Medias con mismo índice no son diferentes estadísticamente p<0.05 Solo para cada variedad pero no entre variedades

Además los resultados para ambas variedades de trigos secados a diferentes temperaturas en relación al trigo control correspondiente, mostraron que el trigo duro Oasis presentó gluten más resistente al tratamiento térmico que el trigo suave de la variedad Salamanca. Mc Dermott (1971), Hook (1980), Tosi *et al.* (1986), Preston *et al.* (1989), Galy y Sutherland (1984), HE *et al.* (1991) y Guerrieri *et al.* (1996) propusieron que existe una mayor fuerza de agregación de las proteínas desnaturalizadas en trigos de gluten fuerte con mayor contenido de proteína mostrando más tolerancia al efecto térmico que los trigos suaves con gluten débil y menor porcentaje de proteína.

6.2.4. Determinación electroforética de las proteínas de las harina de trigo

La figura 24 muestra los patrones electroforéticos de las proteínas de las harinas de trigo para la variedad de trigo Oasis y la Salamanca, tratadas con SDS y con SDS-mercaptoetanol respectivamente.

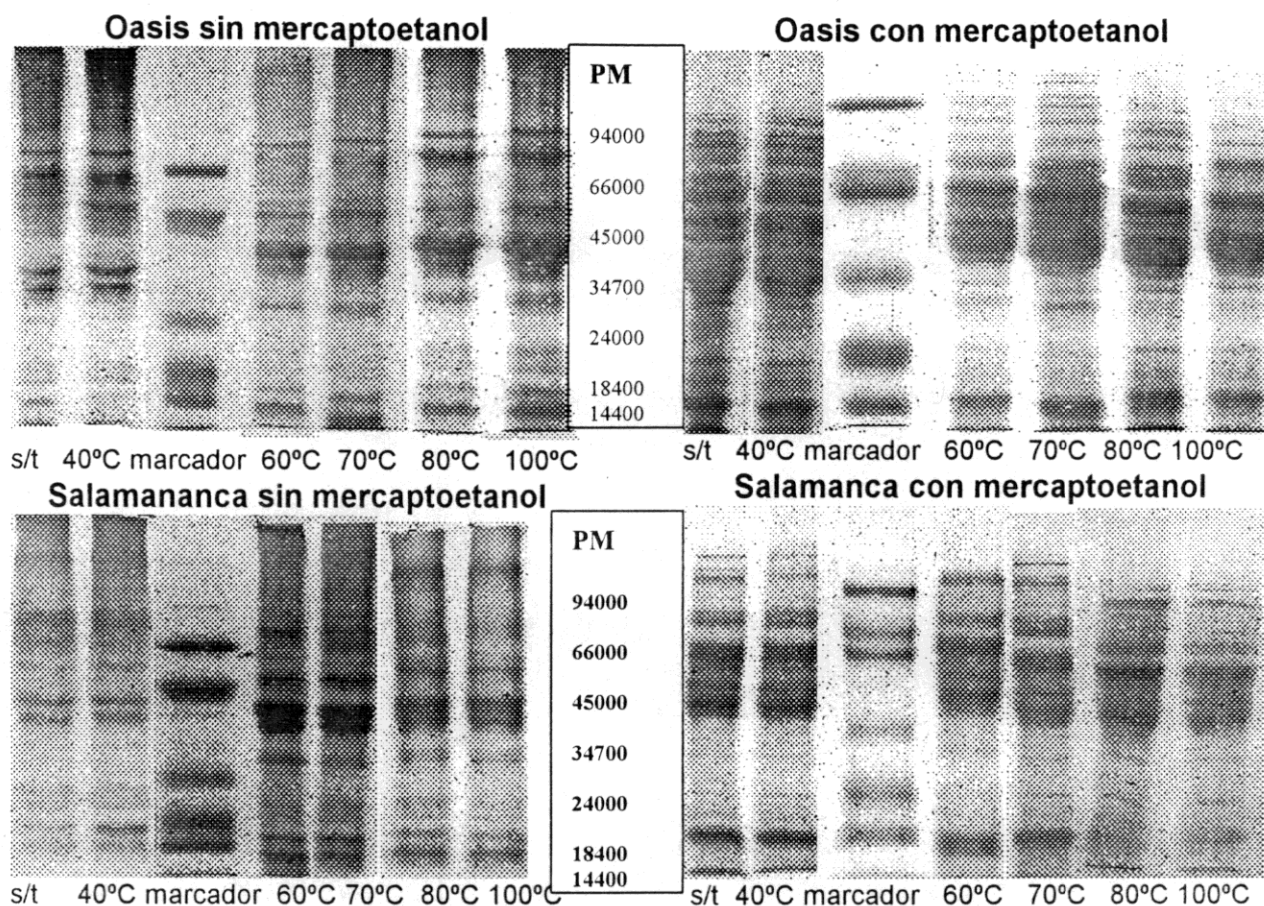


Figura 24 Patrón electroforético de las proteína de harina de ambas variedades de trigo. Muestras de los trigos control y de los secados a diferentes temperaturas tratada con SDS y con SDS y mercaptoetanol. Kit de peso molecular de diferentes proteínas (Sigma), PM=peso molecular conteniendo; 1) fosforilasa-b 94,000, 2) albúmina de suero bovino 67,000, 3) ovoalbúmina 43,000, 4) anhidrasa carbonica 30,000, 5) inhibidor de tripsina soya 20,100 y 6) α -lactoalbumina 14,400

El empleo de un sistema disociante SDS y un agente reductor como el 2-mercaptoetanol, que rompe los enlaces disulfuro de las proteínas determina la complejidad y el peso molecular de los polipéptidos que constituyen una proteína. Si una misma banda de proteína aparece con y sin el agente reductor, la proteína esta formada por una sola cadena polipeptídica. Por el contrario si aparecen más de una banda de menor peso molecular es indicativo de que es una proteína formada por subunidades múltiples. Los patrones electroforéticos para ambas variedades de trigos tratadas con SDS-mercaptoetanol, muestran que tanto el trigo control como los que fueron sometidos

a tratamiento térmico presentaron proteínas formadas por varias bandas de menor peso molecular principalmente en las regiones A correspondiente a las gluteninas, es decir proteínas de alto peso molecular formadas por polipéptidos unidos através de enlaces covalentes. Estas bandas fueron disminuyendo en intensidad particularmente en los trigos sometidos a mayor temperaturas de secado. Pero la disminución de intensidad de bandas en la región de alto peso molecular fue acompañada de un aumento de intensidad de las bandas de la región B y C, lo cual ha sido atribuido al rompimiento de las gluteninas en polipéptidos y a la posterior agregación de estos polipéptidos de menor peso molecular formando proteínas de pesos moleculares similares a las ya existentes y aún formando una proteína de alto peso molecular. Lupano y Añón (1987) reportaron que las modificaciones que sufren las diferentes bandas del patrón electroforético de las proteínas del trigo que fue sometido a tratamiento térmico puede ser causada por la desnaturalización y subsecuente degradación e insolubilización de las proteínas principalmente de las gluteninas. Señalaron que dos tipos de proteínas fueron más afectadas por el tratamiento térmico del trigo, una de alto peso molecular que no se deriva de cadenas unidas con enlaces disulfuro y otras de bajo peso molecular que formó parte de una proteína de alto peso molecular unida por medio de enlaces disulfuro.

Por otro lado las figuras 25, 26, 27 y 28 muestran respectivamente los diagramas densitométricos de las proteínas de las harinas de las variedades de los trigos control y de los trigos secados a diferentes temperaturas, que fueron tratados con SDS y con SDS-mercaptoetanol. Los pesos moleculares se determinaron en base a un kit de marcadores de proteínas de peso molecular conocido, los densitogramas de las muestras de harina para cada variedad de trigo se analizaron por regiones, indicando los rangos de peso molecular de las diferentes fracciones de proteína. En la región A y B, se localizaron las gluteninas con peso molecular entre 11,000 y 133 000 (Bietz y Wall 1972), las gliadinas en la región de peso molecular de entre 30,000 y 45,000 (región C de las mismas figuras) (Bietz y Wall 1972, Sexson y WU 1972; Ewart 1973), excepto las ω -gliadinas que son de alto peso molecular (entre 75,000 y 79,000). En cambio las albúminas y globulinas (que se encuentran en proporción de 10 a 20%) se localizaron en

la región de bajo peso molecular menor de 30,000 (Booth *et al.* 1980) correspondiente a la zona D. En general los patrones electroforéticos mostraron variaciones de los picos de acuerdo a las condiciones de secado de la semilla en la zona de peso molecular de entre 34,000 y 94,000 correspondiente a las gluteninas y en menor grado gliadinas, con modificación de estas proteínas como resultado del tratamiento térmico, observándose estos cambios principalmente en las muestras tratadas con SDS-mercaptoetanol y en menor grado en las muestras tratadas solo con SDS. Booth *et al.*, (1980) y Schofield *et al.* (1983) reportaron que el tratamiento térmico del trigo a altas temperaturas produce desdoblamiento de la estructura tridimensional de las proteínas desnaturalizadas del gluten, provocando fuertes interacciones sulfhidril-disulfuro y la formación de nuevos agregados proteicos unidos principalmente por enlaces covalentes.

Los cambios en las proteínas causados por el tratamiento térmico de secado del trigo se determinaron evaluando las alturas relativas de tres picos (pico 1, 2 y 3) mostrados en los densitogramas de ambas variedades de trigo, (localizados principalmente en la región de alto peso molecular), los cuales fueron medidos con referencia a un pico que casi no mostró variación debido al calentamiento (pico con asterisco en los densitogramas) (tablas 68 y 69). Los picos 1 y 3 de las muestras tratadas solo con SDS muestran menos variación que las muestras tratadas con SDS-mercaptoetanol. Se observa que el pico 2 de las muestras tratadas con SDS-mercaptoetanol disminuye cuando las condiciones de secado son más severas. Como lo reportaron Wall (1979), Simmonds (1978) y Booth *et al.* (1980), las modificaciones ocurridas a las proteínas del trigo que fue sometido a tratamiento térmico pueden deberse al desdoblamiento de las proteínas principalmente gluteninas y gliadinas con intercambio de enlaces disulfuro entre las cadenas de las proteínas que las forman. Propusieron cambios principalmente de las gluteninas, ya que las gliadinas solo presentan enlaces disulfuro que unen a la propia cadena entre sí. Aunque otro tipo de enlaces tales como los puentes de hidrógeno, son también importantes para las propiedades funcionales del gluten no obstante el efecto de temperatura resulta más fuerte sobre los enlaces covalentes disulfuro.

Tabla 68 Alturas relativas de los picos (1,2,3) región B de los densitogramas del trigo variedad Oasis

Picos	Tratamiento						
		S/T	40°C	60°C	70°C	80°C	100°C
1	SDS	0.50	0.416	0.500	0.444	0.444	0.407
1	SDS+ME	0.50	0.396	0.366	0.373	0.459	0.354
2	SDS	0.73	0.666	0.800	0.629	0.629	0.690
2	SDS+ME	0.76	0.689	0.666	0.671	0.655	0.564
3	SDS	0.71	0.516	0.666	0.629	0.703	0.648
3	SDS+ME	0.90	0.862	0.900	0.910	0.934	0.838

S/T= sin tratamiento, SDS= Dodecil sulfato de sodio, ME= mercaptoetanol

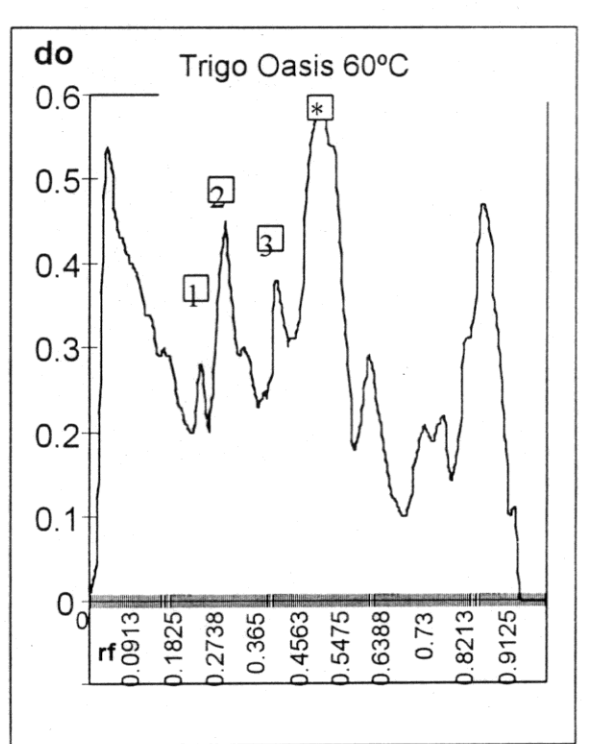
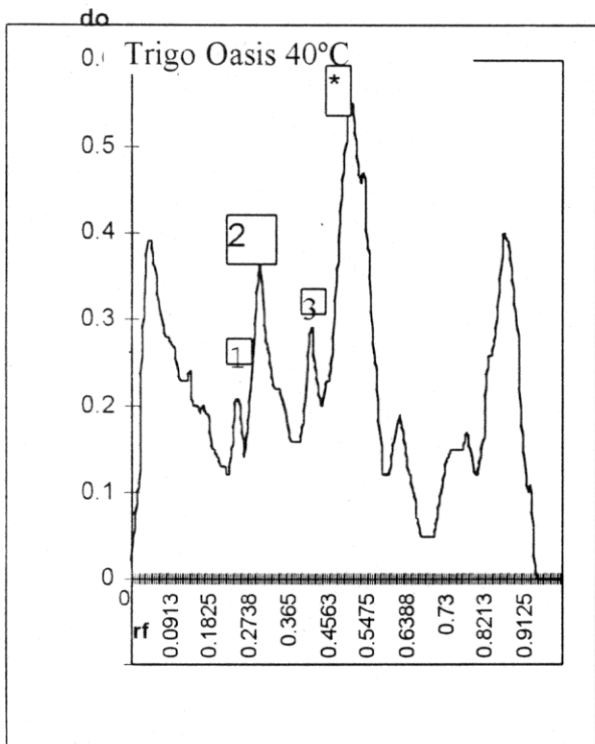
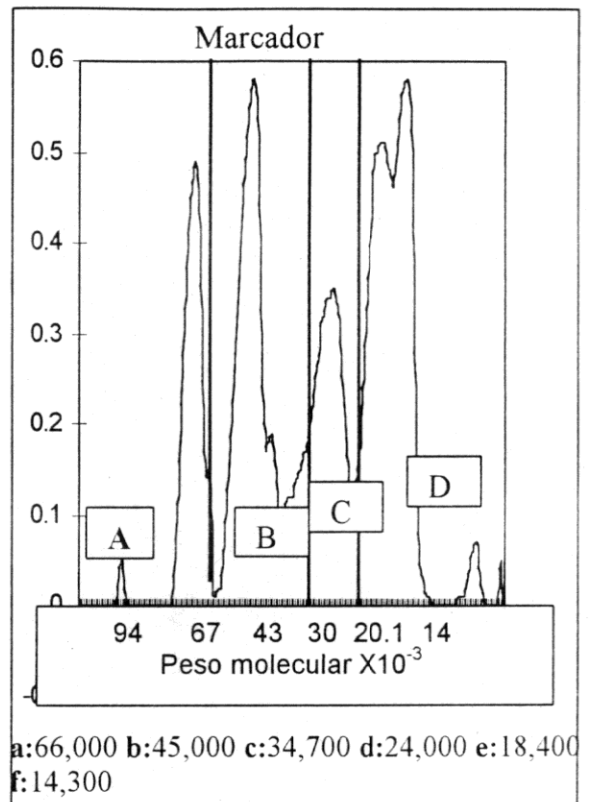
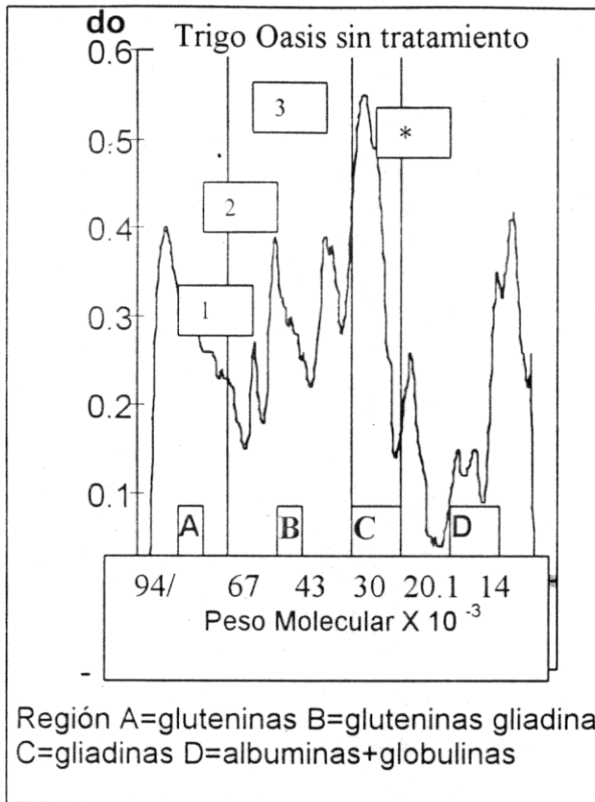
Tabla 69 Alturas relativas de los picos (1,2,3) región B de los densitogramas del trigo variedad Salamanca

Picos	tratamiento						
		S/T	40°C	60°C	70°C	80°C	100°C
1	SDS	0.535	0.656	0.631	0.529	0.473	0.467
1	SDS+ME	0.592	0.571	0.550	0.533	0.603	0.468
2	SDS	0.464	0.468	0.421	0.402	0.421	0.397
2	SDS+ME	0.870	0.785	0.700	0.700	0.689	0.531
3	SDS	0.767	0.656	0.666	0.656	0.631	0.647
3	SDS+ME	0.870	0.892	0.883	0.883	0.896	0.890

S/T= sin tratamiento, SDS= Dodecil sulfato de sodio, ME= mercaptoetanol

Weegels *et al.* (1994) mostraron que las proteínas del trigo pueden ser afectadas por temperaturas mayores de 50°C provocando la desnaturalización y agregación del gluten modificando las propiedades reológicas de las masas de trigo y provocando disminución de la solubilidad de las proteínas en diferentes solventes. Jeanjean *et al.* (1980) estudiaron gluten de trigo secado a 100°C proponiendo la agregación de proteínas a través de enlaces disulfuro con cambios conformacionales particularmente de las gluteninas. Señalaron que los nuevos enlaces disulfuro aparentemente estabilizan la proteína en el estado desnaturalizado siendo el proceso irreversible y produciendo gluten muy tenaz que no puede ser desarrollado satisfactoriamente durante la fase de mezclado del proceso de panificación. El secado del trigo a altas temperaturas provoca que las proteínas de trigo se desnaturalicen y agreguen, como lo muestran los cambios en los patrones electroforéticos, perdiendo capacidad de retención de agua y provocando disminución del volumen del pan

Figura 25 Diagramas densitométricos correspondientes a los patrones electroforéticos (figura 23) de diferentes harinas de trigo Oasis (muestras tratadas con SDS)



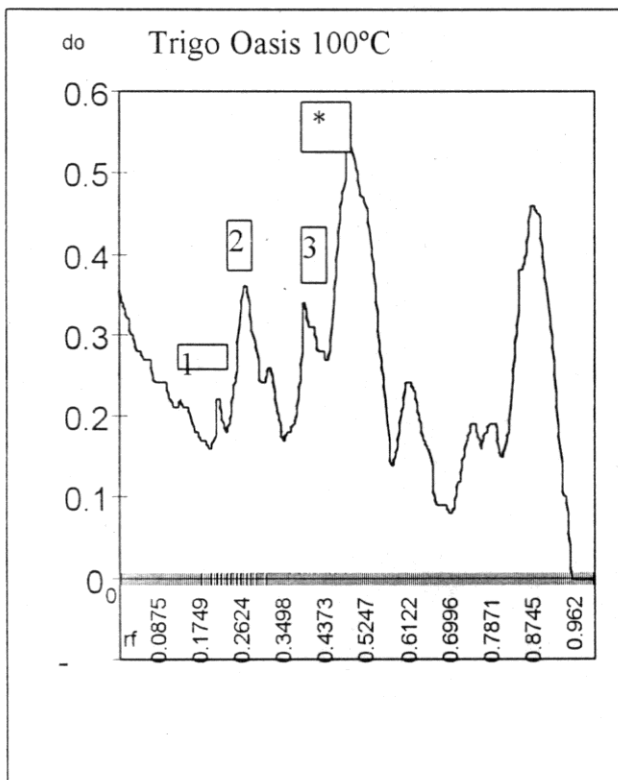
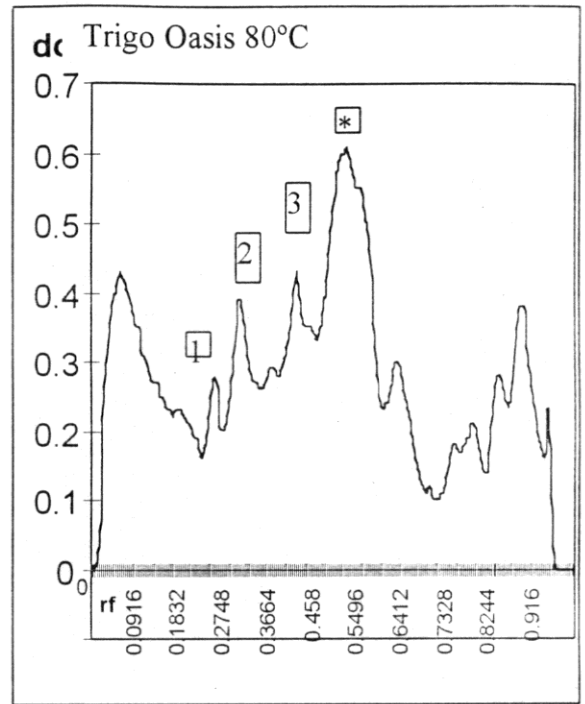
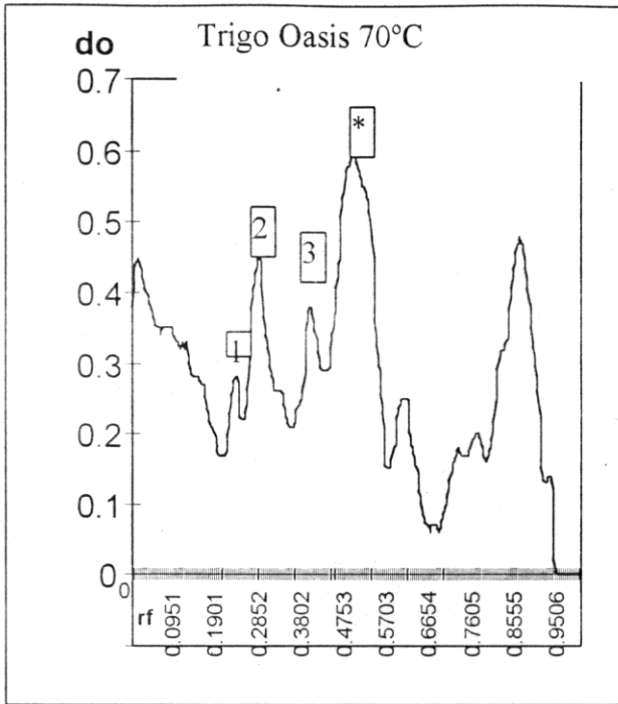
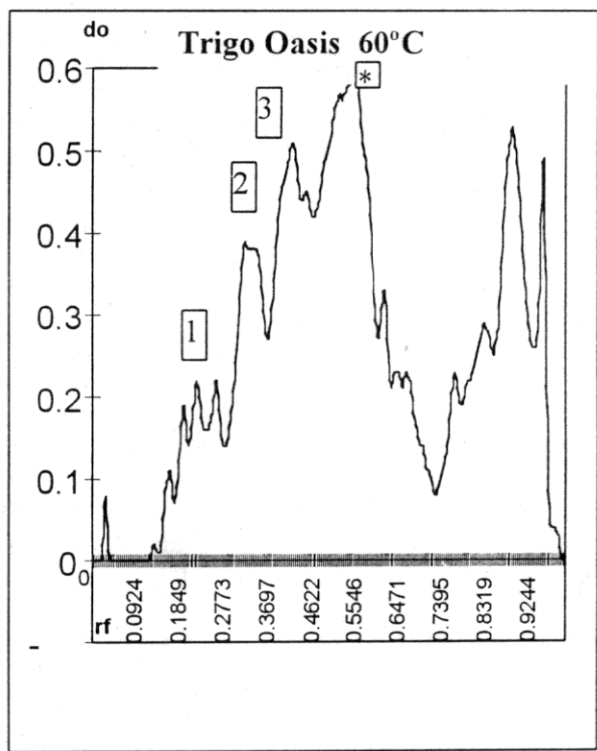
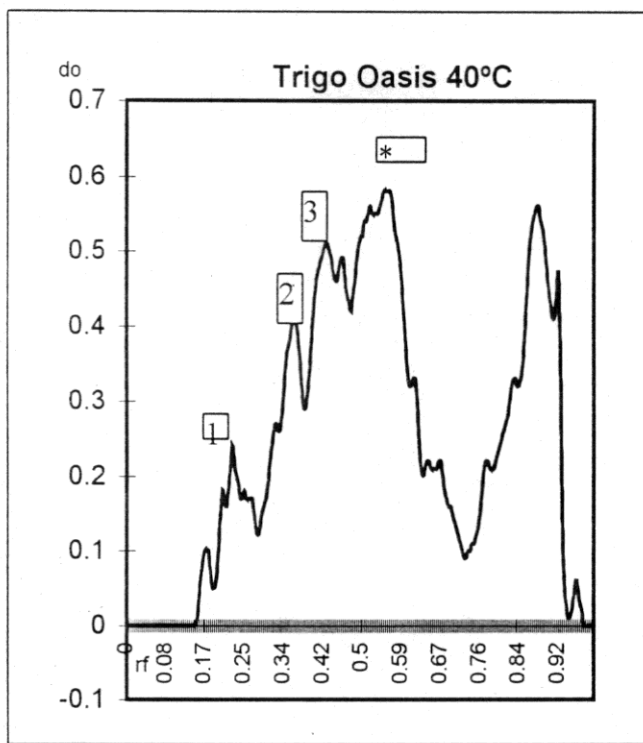
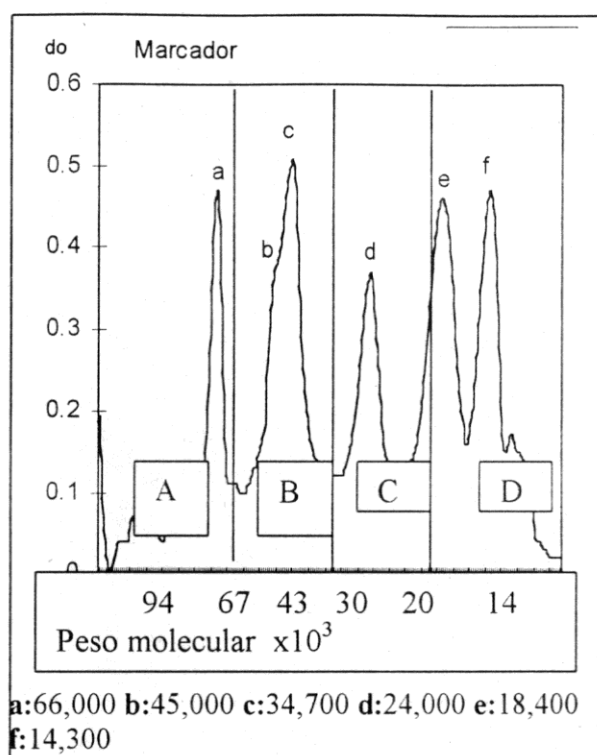
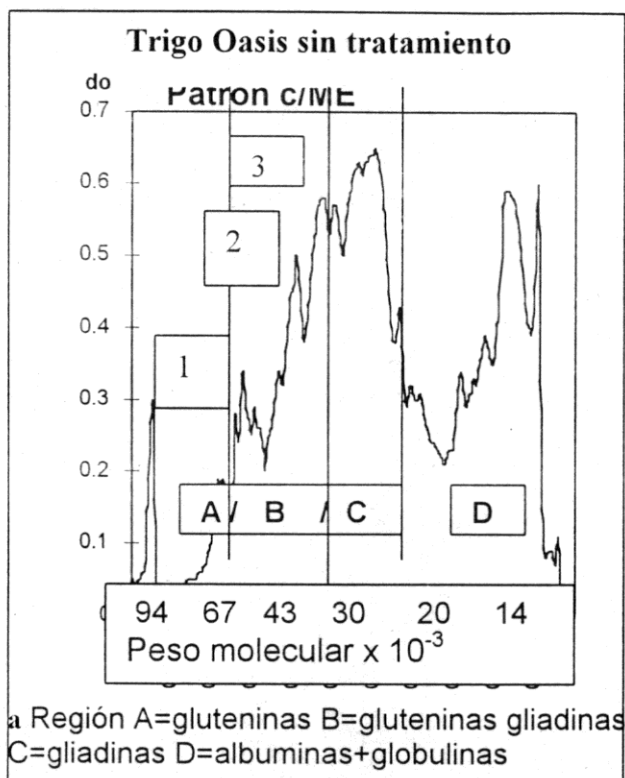


Figura 26 Diagramas densitométricos correspondientes a patrones electroforéticos (figura 23) de diferentes harinas de trigo Oasis (muestras tratadas con SDS-mercaptoetanol)



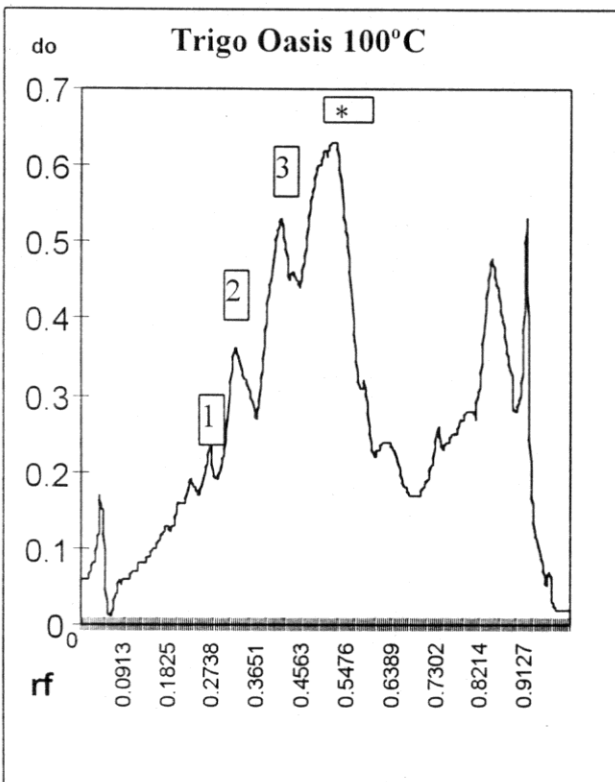
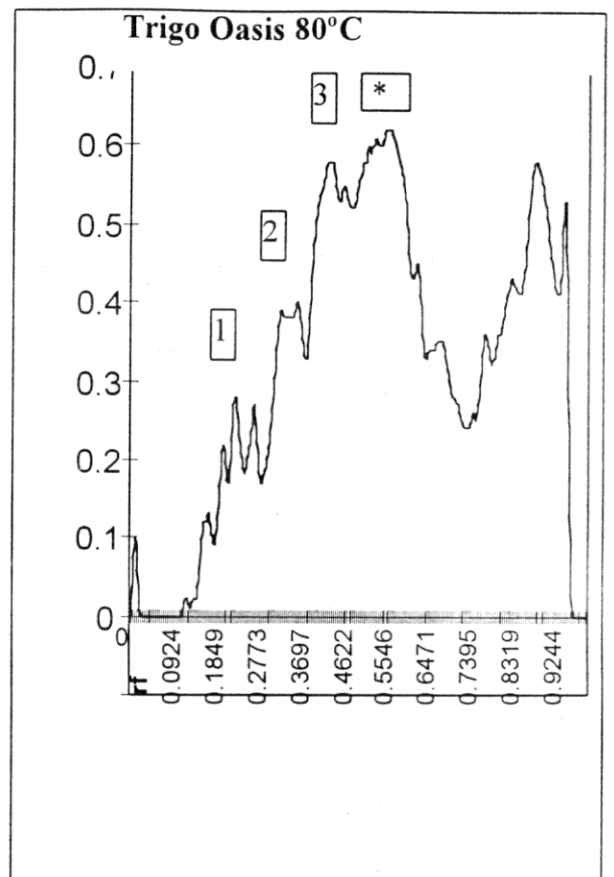
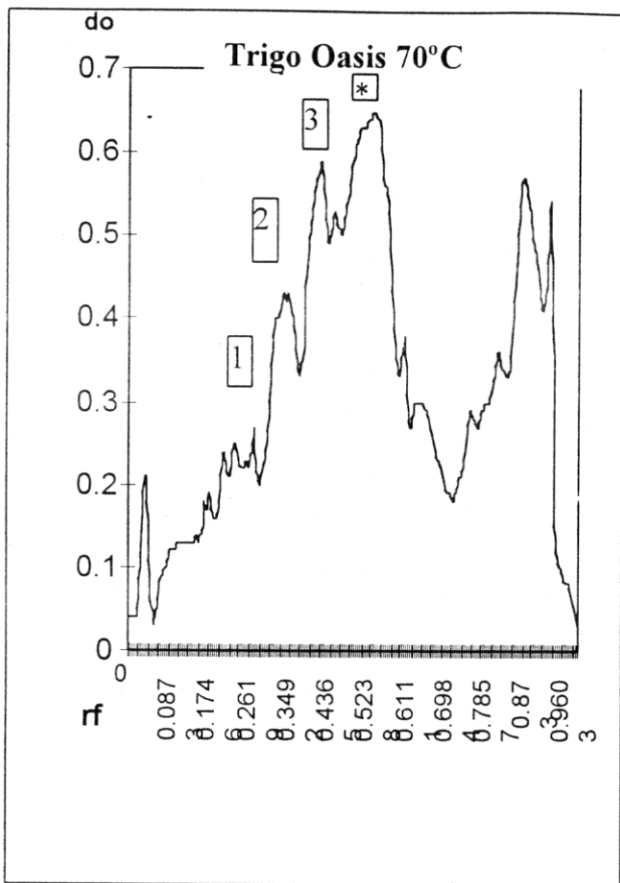
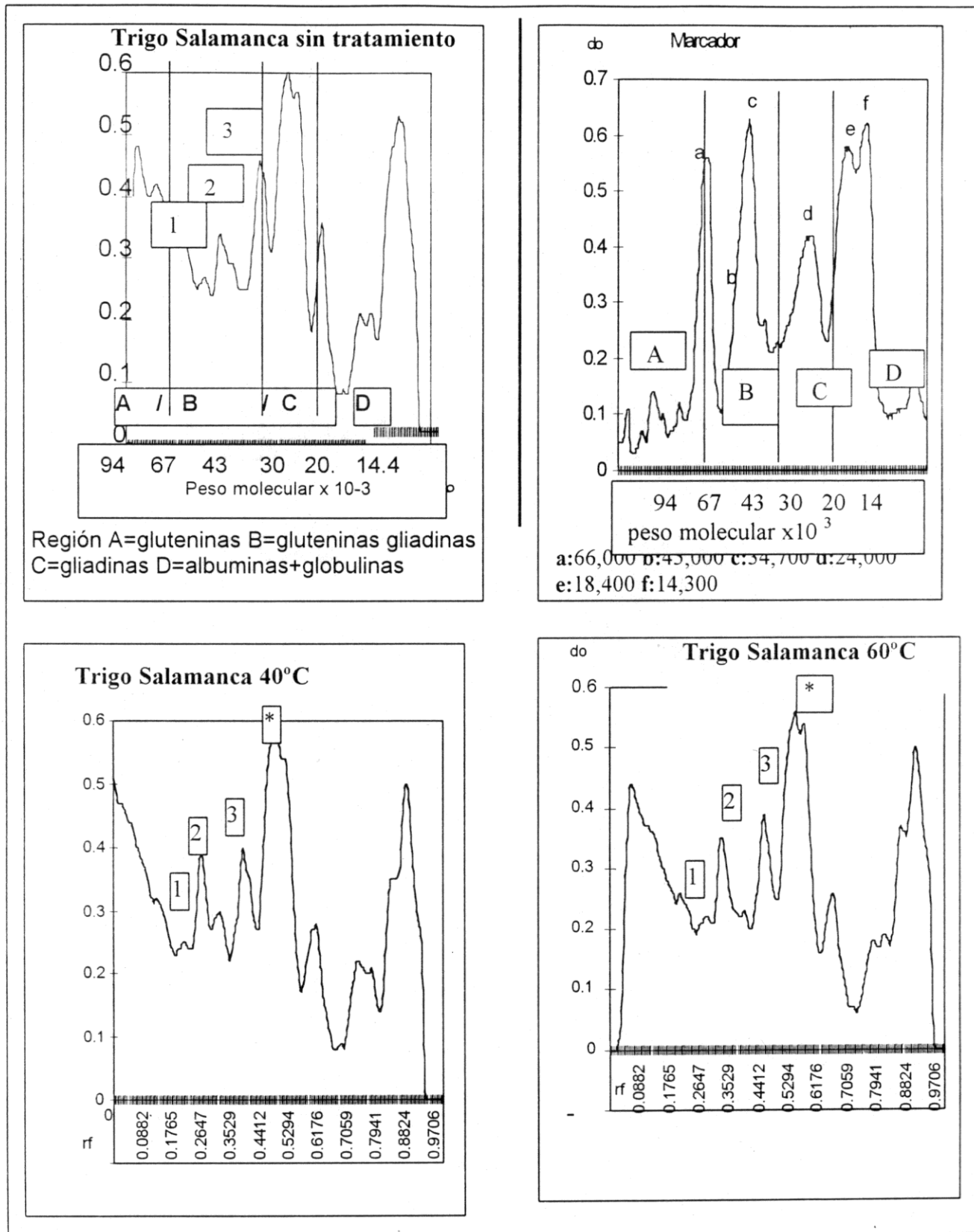


Figura 27 Diagramas densitométricos correspondiente a patrones electroforéticos (figura 23) de diferentes harinas de trigo Salamanca (muestras tratadas con DSD)



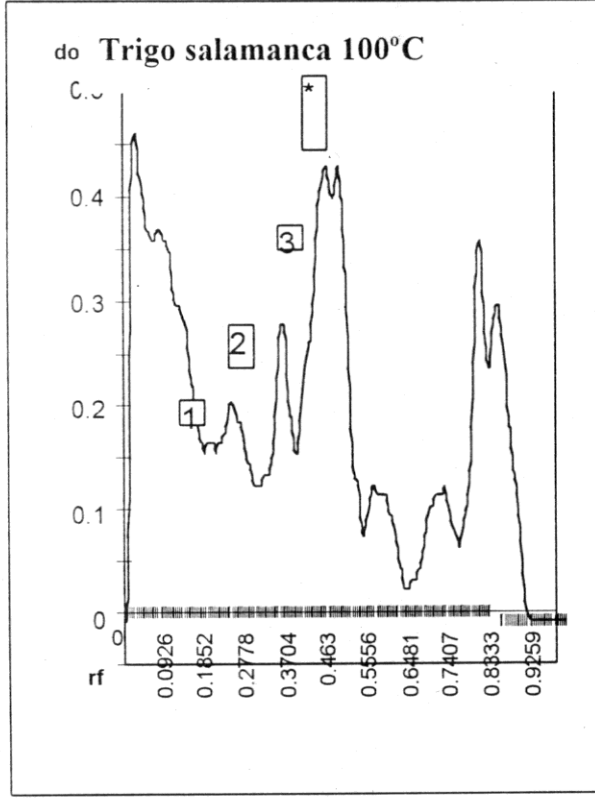
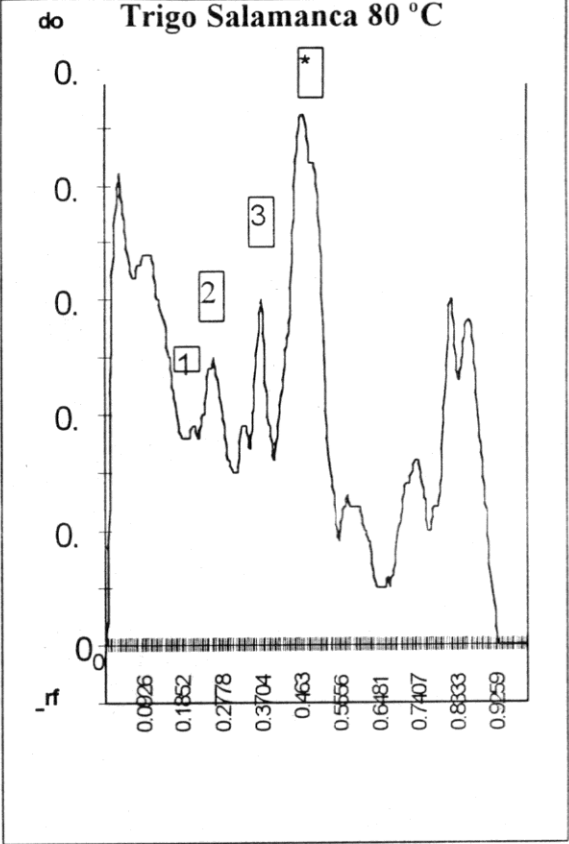
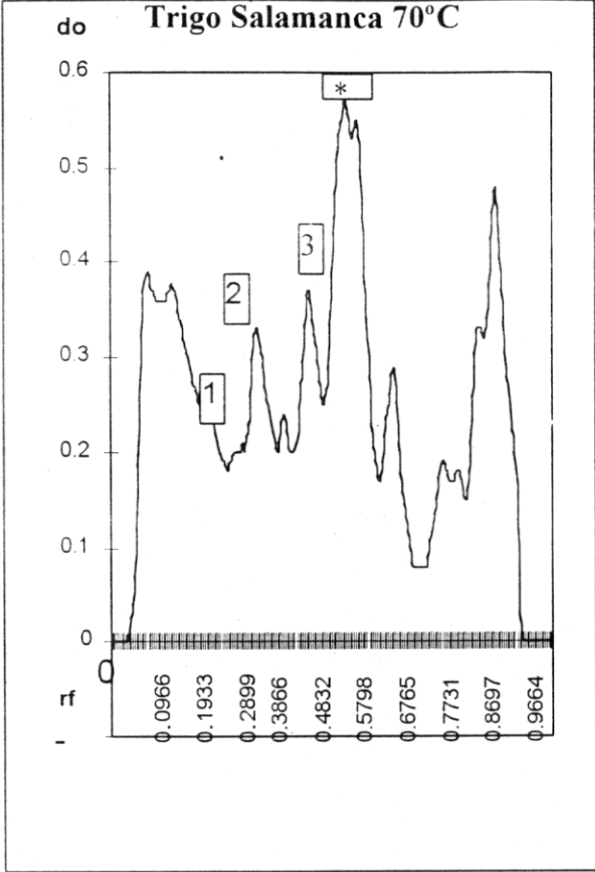
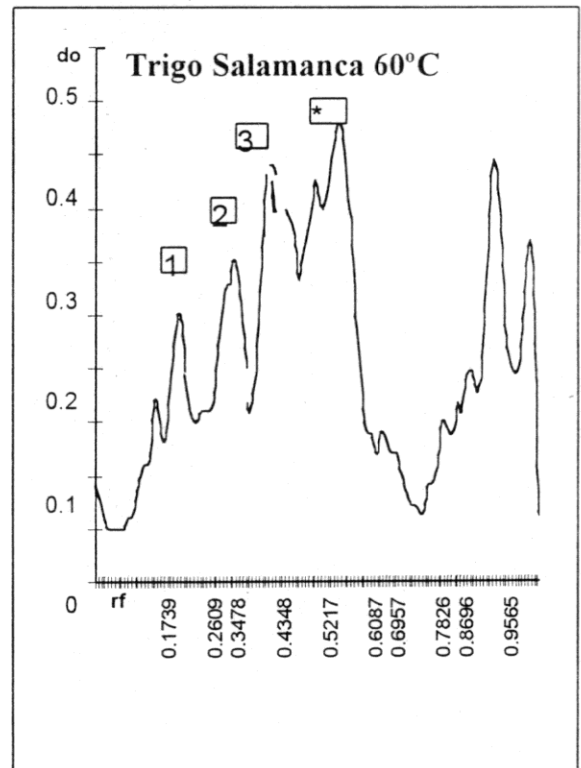
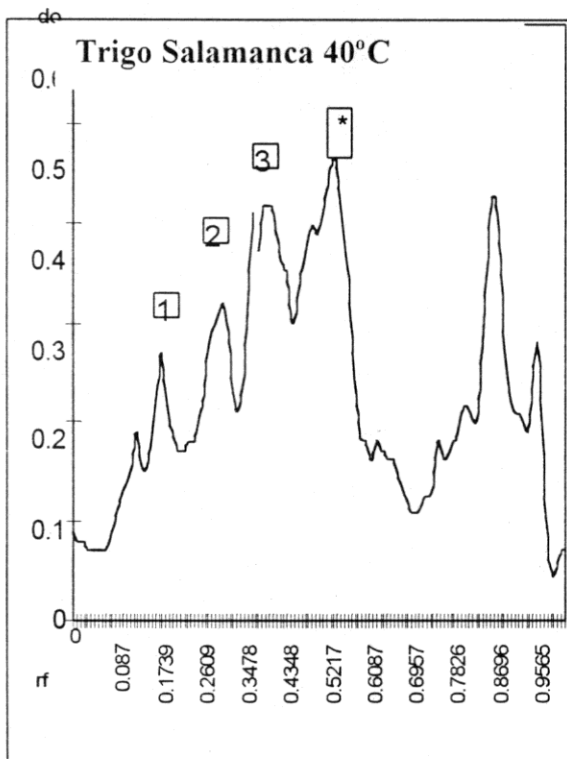
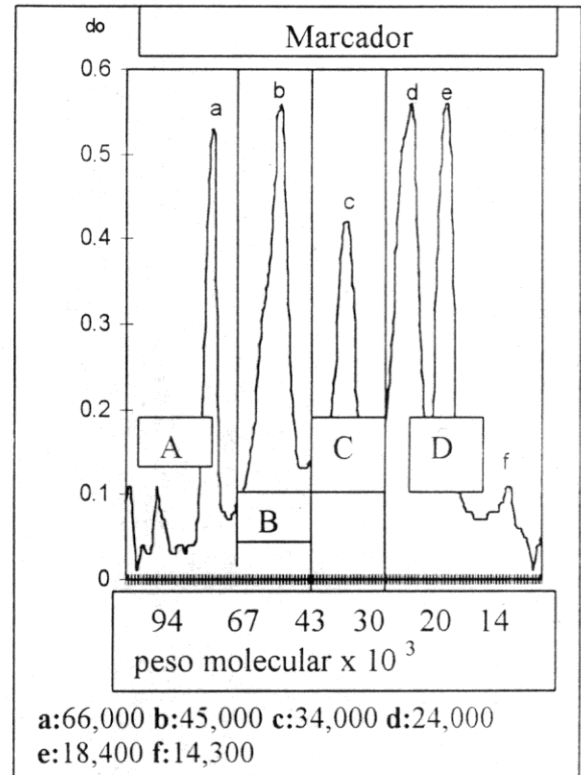
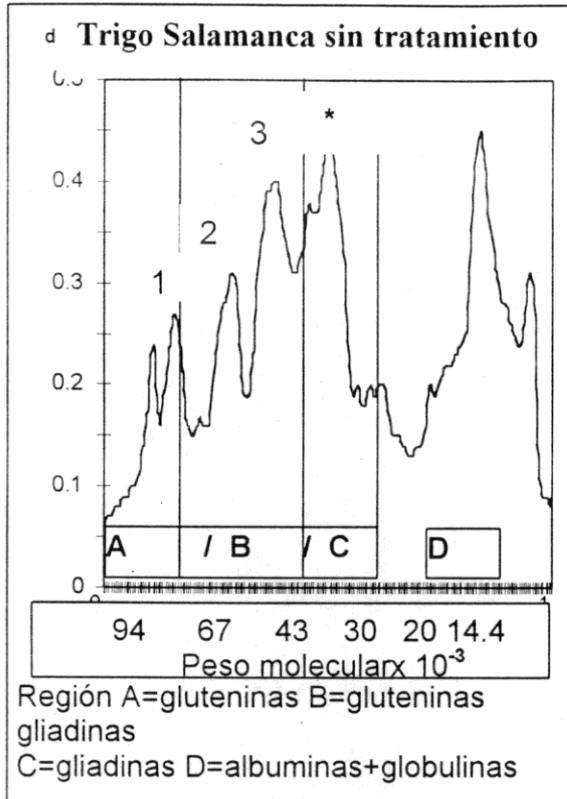
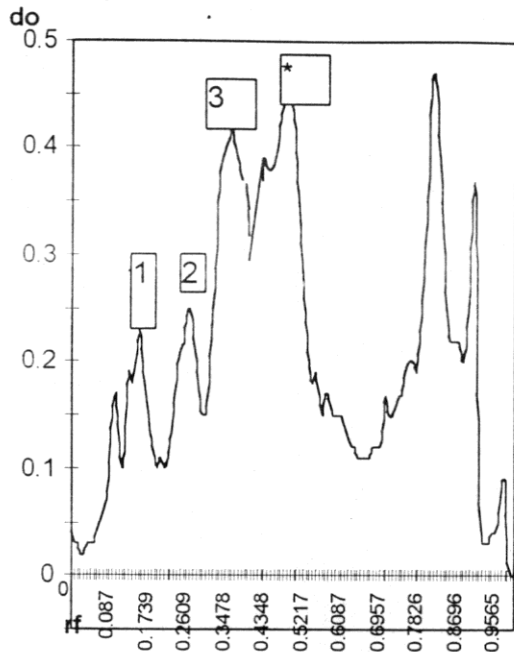


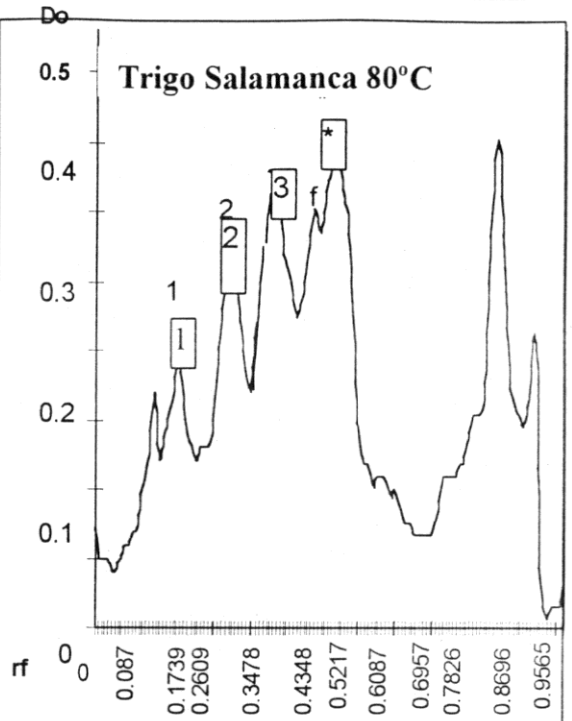
Figura 28 Diagramas densitométricos correspondientes a patrones electroforéticos (figura 23) de diferentes harinas de trigo Salamanca (muestras tratadas con SDS-mercaptoetanol)



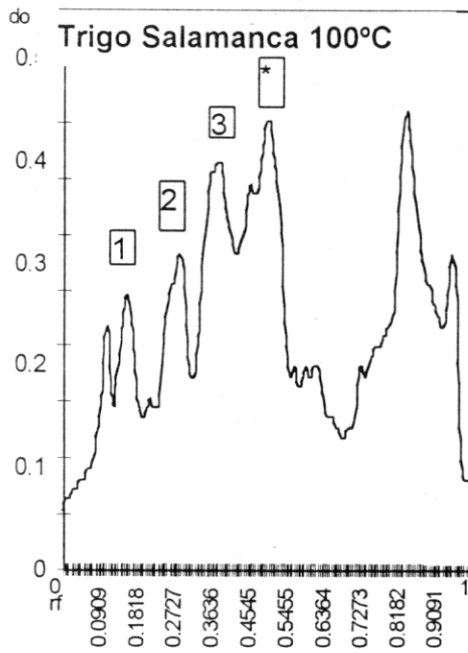
Trigo Salamanca 70°C



Trigo Salamanca 80°C



Trigo Salamanca 100°C



7. CONCLUSIONES

Las curvas de secado para ambas variedades de trigos, con períodos de secado decreciente, mostraron que la variedad de trigo Salamanca alcanzó humedades finales más bajas que la variedad de trigo Oasis, dependiendo principalmente de la estructura y composición grano.

El contenido de humedad inicial del grano, las variedades y temperaturas de secado mostraron efecto significativo sobre el peso hectolítrico y la dureza del grano.

El porcentaje de cenizas y el contenido de proteína total solo presentaron diferencias significativas entre variedades.

El mixógrafo de Swanson mostró ser un equipo sensible y de fácil ejecución para realizar el análisis reológico de las masa de trigo que fue sometido a tratamiento térmico de secado

El daño causado al trigo por el tratamiento de secado se reflejó mas eficientemente al medir el volumen de la hogaza.

Las harinas de los granos de ambas variedades de trigos secados a 40, 60 y 70°C proporcionaron masas ligeramente más fuertes y elásticas que la de las harinas control, además de reportar un volumen del pan mayor o igual al del control.

El deterioro en la calidad del trigo debido a un tratamiento térmico excesivo (80 y 100°C) produjo harinas de mala calidad panadera, con leudado deficiente o nulo.

Tanto el porcentaje de gluten así como la solubilidad en NaCl de las proteínas de las harinas, la propiedades reológicas de las masas de trigo y los valores del volumen del pan fueron significativamente diferentes entre variedades y entre temperaturas disminuyendo en ambas variedades de trigo conforme aumentó la temperatura de secado como resultado de la agregación y desnaturalización térmica de las proteínas.

El trigo de la variedad Salamanca S75 con gluten débil y menor porcentaje de proteína sometido a tratamiento térmico de secado sufrió mayor deterioro en las características fisicoquímicas y de panificación que las del testigo correspondiente y que las de trigo de la variedad Oasis F89, de gluten fuerte y con mayor porcentaje de proteína.

La comparación de muestras antes y después del secado indicaron una clara proporción del daño por calor causado al grano.

Los cambios físicos, químicos, reológicos y de panificación que sufrieron ambas variedades de trigo sometidas a tratamiento térmico de secado, están relacionados con modificaciones en las proteínas del trigo, principalmente las del gluten, como lo muestran los patrones electroforéticos realizados

8. BIBLIOGRAFIA

- Almacenes Nacionales de Depósito, S. A. (ANDSA) (1978). Departamento de Almacenes y Conservación. Laboratorio Central. pp;10-20. Manual de Procedimiento de Muestreo y
- Análisis de granos. México American Association of Cereal Chemists. (1983). Approved Method of the AACC. Cereal Laboratory Methods. Am. Assoc. Cereal Chem., Inc. Vol 1, 2., 8ª Ed. St. Paul Minn, USA.
- Aragón M. J. y Ocaña A. (1988). Estudio cinético de la desecación de granos de guisante y bulbos de puerro en lecho fluidizado eruptivo. *Rev. Agroquim. Tecnol. Aliment*, 28 (3) 357-369
- Bakker-Arkema, F. W., Brooker, R. C. y Lerew, L. E. (1978). Cereal grain drying. Ch.1. In. *Advances of Cereal Science and Technology.*, Vol II, pp 219-328. Y. Pomeranz., Am. Assoc. Cereal Chem., St. Paul Minn, USA.
- Becker, H. A y Sallans, R. H. (1960). Drying wheat in a spouted bed on the continuous moisture diffusion controlled drying of solid particles in a well-mixed isothermal bed. *Chem. Eng. Sci.* 13(3):97-99
- Bietz, J. A. y Wall, J. S. (1972). Wheat gliadin subunits: Molecular weights determined by sodium dodecyl sulfate-polyacrylamide gel electrophoresis. *Cereal. Chem* 49:416-420
- Booth, M. R., Bottomley R. C., Ellis J. R., Malloch G., Schofield J. D. y Timms M. F. (1980). The effect of heat on gluten physico-chemical properties and baking quality. *Ann. Technol. Agric.* 29(2):399-408
- Bottomley, R. C. Kearns H. F. y Schofield J.D. (1982) Characterization of wheat flour and gluten proteins using buffers containing sodium dodecyl sulfate *J. Sci. Food agric.* 33:481-486
- Bradford, M. M. (1976). A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein dye-binding. *Anal. Biochem.* 72:248-254
- Brennan, J. G., Butters, J. R., Cowell, N. D. y Lilly, A. (1980). Las operaciones de la ingeniería de los alimentos capítulo 12, pp 236-279, 2ª Ed. Acirbia, Zaragoza, España
- Brooker, D. B. Bakker-Arkema, F. W. y Hall C.W (1975). Drying cereal grain, pp 20, 51-54. The A.V.I. Publishing Company, Inc. Westport, Conn. U.S.A.
- Bruce, M. D. (1992). A model of the effect of heated-air drying on bread baking quality of wheat. *J. Agric. Eng. Res* 52:53-76

Bushuk, W. (1982). Future of wheat breeding: A key role for the chemist. *Cereal Food World*.27:224-227

Carbajal, J. M. y Castillo, C. F., (1977). La harina de trigo en México. Su calidad. *Rev. Pan*:256. México, D. F.

Contreras, R. M., Zarate V. J., Santoya C. H y Pérez B. R. (1993). Principales regiones productora de trigo. En: *Perspectivas de la producción de trigo en la región del sur de Sonora frente al Tratado Trilateral de Libre Comercio*: pp 24-25. Universidad Autónoma Chapingo Centro de Investigaciones Económica, México

Chacón, C. (1975). Clasificación de las variedades de trigos de México pp 1-30 laboratorio de farinología del INIA Chapingo. Tex. México

Chistonsen, C. M. (1974). Storage of cereal grains their products Ed. Am. Assoc. Cereal Chem., pp 1-55, St. Paul. Minn. USA.

Davidson, J. y Harrison D. (1971). Fluidization. pp 50-80. Academic Press London

Dermott y Evans D. E. (1978). An evaluation of fluidized-bed heating as a means of desinfesting wheat. *J. Stored Prod. Res.*14:1-12

Dexter, E. J., Matsuo R. R. y Daniel W.R. (1989). The influence of heat damage on durum wheat spaghetti quality. *Can. Inst. Food Sci. Technol. J.* 22(3):229-237

Draper, S. R. y Stewart B.A. (1980) Procedures for the comparative asseement of quality in crop varieties III Methods used in assessing grain protein content. Hagberg Falling number, ease of milling and baking quality of wheat varieties. *J. National Inst Agric Botany* 15:194-197

Durham, R. K. A (1962). Measure of maximum potential baking strength of wheat, the sedimentation test, *Cereal Sci. Today* 7(1):13-15

Earle, L. R. (1988). Ingeniería de los alimentos, pp 83-100. 2ª Ed. Acribia, Zaragoza, España

Evans, E.D., Thorpe R. G. y Dermott (1983) The desinfestation of wheat in a continuos-flow fluidized bed *J. Stored. Prod. Res* 19(3);125-137

Evans, D. E. y Dermott T. (1981) Dosage mortality relationships for *Rhyzopertha dominica* (F) (Coleoptera Bostrychidae) exposed to heat in a a fluidized bed. *J. Stored Prod. Res* 17:53-64

Every, D. (1987). A simple, four-minute, protein-solubility test for heat damage wheat. *J Cereal Sci.* 6:225-236

Ewart, J.A.D. (1973). Sodium dodecyl sulfate electrophoresis of wheat gliadins. *J. Sci. Food. Agric.* 24:685-696

FAO. Organización de Las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación. Estadísticas mundiales producción trigo. <http://www.fao.org>

Fellow, P. (1994). Tecnología del Procesamiento de los Alimentos, pp 287-323. Ed. Acribia: Zaragoza, España

Finney, K. F., Shogren, M. D., Hosney, R. C., Bolte, L. C. y Hoyne, E. G. (1962). Chemical, physical and baking properties of preripe wheat dried at varying temperatures. *Agron. J.* 54:244-247

Galvéz, M. R. (1968). Aspectos del mejoramiento de los cereales en México Memorias del tercer pp125-148. Congreso Nacional de Fitogenética. Sociedad Mexicana de fitogenética

Geankoplis, J. Ch. (1995). Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias, pp 435-492 CECSA, 2a ed. México, D.F.

Geldart, D (1986) Gas fluidization. I. Chem E. Continuing, pp17-20. Education Course. University Bradford

Ghaly, T. F. y Sutherland J. W. (1984). Heat damage to grain and seed. *J. Agric Eng Res* 30:337-341

Ghaly, T. F., y Taylor, P. A., (1982). Quality effects of heat treatment of two wheat varieties., *J. Agric. Eng. Res.* 27:227-234

Ghaly, T. F. y Van der Touw J. W. (1982). Heat damage in relation to high temperature desinfestation of wheat. *J. Agric. Eng Res.* 27:329-336

Ghaly, F. T., Edwards, R. A. y Ratcliffe, S. J. (1973). Heat-induced damage in wheat as a consequence of spouted bed drying. *J. Agric. Eng. Res.* 18:95-106

Giner, A. S. y Calvelo A. (1987). Modelling of wheat drying in fluidized beds. *J. Food Sci* 52(5):1358-1363

Giner, S. A., Lupano C. E. y Añón M.C. (1991). A model for estimating loss of wheat seed viability during hot-air drying. *Cereal Chem.* 68(1):77-80

Guerrieri, N. E., Alberti, Lavelli V. y Carletti P. (1996) Effect of high temperature short-time treatment of wheat flour on gluten vitality and structure. *Cereal Chem* 73(3):375-378

Hall G. E. (1963). High temperature wheat drying. Ohio. *Farm Home Re.* 48(4):60-61

- Halverson, J. y Zeleny L. (1988). Criteria of Weath Quality In: Pomeranz Y. (ed), Wheat Chemistry and Technology. Vol I y II pp 69-90: Am. Assoc. Cereal Chem., St. Paul. Minn.
- Harrison, R. K., Doarks P. F. y Greer E. N. (1969) Detection of heat damage in dread wheat *Milling* 151:37
- Hayward, C.F. (1987) The effect of date of hervest on the grain quality of winter wheat at Terrington experimental husbandry farm 1982-85. *Aspec of Applied Biol*15:181-187
- He, H.G. Feng H. and Hosenev R.C: (1991). Differences between flours in the rate wheat proteins solubility. *Cereal Chem.* 68(6):641-664
- Hook, S. C. W. (1980). Dye-binding capacity as a sensitive index for the thermal denaturation of wheat protein. A test for heat-damaged wheat. *J. Sci. Food Agric.* 31:67-81
- Hosenev, R. C. (1991). Estructura de los cereales, pp 67-80. En: Hosenev R.C. (ed), Principios de Ciencia y Tecnología de los cereales: Acribia S.A. Zaragoza, España
- Hosenev, R. C. y Finney, K. F. (1971). Functional (breadmaking) and biochemical properties of wheat flour components. XI. A Review. *Baker's. Dig.* 45(4):30-40
- Housley, Y. Kirleis W. A. Ohm H.W. y Patterson F.L. (1981) Evaluating seed growth in soft red winter wheat. *Can. J. Plant Sci.* 61:525-534.
- Hutchinson, J.B. (1944) The drying of wheat III The effect of temperature on germination capacity *J. Soc. Chem. Ind., London* 63:104
- Irizar, G. M. (1990). Caracterización de variedades de trigo (*Triticum aestivum*) y cebada (*Hordeum vulgare*) por electroforesis de sus prolaminas. 105p Tesis de Maestro en Ciencias. Colegio de Posgraduados. Montecillos. México
- Iruegas, E. A. (1975). Estrategias de selección por atributos de calidad en el programa de mejoramiento genético del cultivo del trigo. Laboratorio de calidad CIAMEC-INIA.
- Jeanjean, M. F. Damidaux R. y Feillet P. (1980). Effect of heat treatment on protein solubility and viscoelastic properties of wheat gluten. *Cereal Chem.* 57(5):325-331
- Jeanjean, M. F. y Feillet, P. (1978). Physicochemical properties of wheat gel proteins. *Cereal Chem.* 55(6), 864-876
- Kent, L. N. (1987). Tecnología de los Cereales. pp:69-83. Ed. Acribia, S.A. Zaragoza, España

- Khan, K. y Bushuk, W. (1978). Glutenin: Structure and funcionality in breadmaking. *Baker's Dig.* 52(2):14-20
- Khan, K. y Bushuk, W. (1979). Structure of wheat gluten in relation to funcionality in breadmaking, pp 179-180. In: *Funcionality and protein structure*. Washington, D.C: American Chemical Society
- Khan, K. y Bushuk, W. (1979). Studies of glutenin. XII. Comparison by SDS-page of unreduced glutenin from various and purification procedures. *Cereal Chem.* 56(2):63-68
- Kirleis, W. A., Housley L. T. Emam M. A. Patterson L. F. y Okos R.M. (1982). Effect of preripe harvest and artificial drying on the milling and Baking quality of soft red winter wheat. *Crop Sci.* 22: 871-876
- Kunii, D. y Levenspiel O. (1991). *Fluidization Engineering*. Butterworth-Heinennon 2ª Ed. Series in Chem Eng. USA 61-94
- Laemmli, V. (1970). Cleavage of structural proteins during the assembly of the head of bacteriophage. T. A. *Nature* 227:680-685
- Laemmli, U. K. y Favre M. (1973). Maturation of the head of bacteriophage T. *J. Mol. Biol.* 80:575-578
- Lindberg, J. E. y Sorenson E. I. (1959) Relationship between critical kernel temperatures and moisture contents with respect to germinating properties of wheatKunfl. Skogsoch Lantbruks Akademiens Tidsk Suplemento 1, Estocolmo, Suecia
- Lupano, E. C. y Añón C. M. (1986). Denaturation of wheat germen protein during drying. *Cereal Chem.* 63(3):259-263
- Lupano, E. C. y Añón C. M. (1987). Denaturation of wheat endosperm proteins during drying *Cereal Chem.* 64(6):437-442
- Lupano, E. C. y Añón, C. M. (1988). A simple and rapid test for drying damage in wheat. *Cereal Chem.* 65(1):49-51
- Macritchie, F (1980a). Physicochemical aspect of some problems in wheat research pp 271-326 In: *Advances in cereal science an Technol.* Vol 111. Y. Pomeranz ed. Am. Assoc. Cereal Chem. St. Paul, Minn. USA.
- Macritchie, F. (1980b). Studies of gluten protein from wheat flours. *Cereal Food World* 25(7):382-385
- McDermott, E. E. (1971). The turbidity test as a measure of thermal denaturation of proteins in wheat. *J. Food Agric.* 22:69-72

Mendoza, A. M., Vernon, E. J. y Vizcarra, G. M. (1985). Determinación de curvas de secado de granos de maíz por fluidización. *Tecnol. Aliment. (Mex)*, 20(2):20-26

Monsivais, T.M. (1977). El concepto de calidad en el mejoramiento genético del trigo. Boletín de intercambio científico. *SOMEFI II(3)* 45-85

Montgomery, D. C., (1991). Diseño y análisis de experimentos, pp 45-85. Grupo, editorial Iberoamerica S.A. de C.V. México.

Mounfield, J. D., Halton, P. y Simpson, A. G. (1944). The drying of wheat the drying of English wheat. *J. Soc. Chem. Ind* 63:97-104

Multon, J. L. (1984) Physical y biological mechanism of alteration in bulk grains. Interest of refrigeration for reducing the risks of lost. Anales del seminario la refrigeración como medio para disminuir las pérdidas Post- Cosecha argentina Vol II p 5

Mujumdar S.A. (1987). Hadbook of Industrial Drying pp 1-40. Ed. Marcel Dekker Inc.NY USA

Nellist, M. E. (1987). Modelling the performance of a cross flow grain dryer: *J. Agric. Eng. Res.* 37(1):43-57

Nellist, M.E. (1980) Safe drying temperatures for seed grain, pp371-378 in: Seed production P.D. Hebblethwaite, ed Butterworth London

Norma Oficial Mexicana NOM-F-7-(1982). Harina de trigo y NOM-FF-36-(1982). Productos alimenticios para uso humano no industrializado cereal trigo (*Triticum aestivum*, *T. durum*) especificaciones. Secretaria de patrimonio y fomento industrial. Dirección general de normas México

Orth, R. A. y Bushuk, W. (1972). A comparative study of the proteins of wheats of diverse baking quality. *Cereal Chem.* 49:268-275

Pace, J. (1962). Recent work on the proteins of wheat flour in recent advances in processing cereals, pp 40-80. SCI Monograph No16 Society of chemical industry. London

Pomeranz, Y. (1988). Wheat Chemistry and Technology .Vol I and II. Third Ed. Y.Pomeranz. Am. Assoc. Cereal Chem., St. Paul. Minn., U.S.A.

Pomeranz, Y. (1991). Proteins general, pp. 147-189 In: Pomeranz Y. (ed), Functional Properties of Food Components: Academic Press, San Diego CA.

Preston, R. K., Morgan C. B., Kilborn H. R. y Tipples H. K. (1989). Assessment of heat damage in Canadian hard red spring wheats. *Can Inst Food Sci Technol J.* 22(1):63-69

Rasner J. H. (1954) Effects of drying temperature on quality of wheat III Agric Exp. Stn. Ciro 730

Rodríguez, B. F. J. y Salazar, S. A. (1980). Evaluación de la calidad de trigo. Publicación CIANO No.37

Sagar., Secretaria de Agricultura Ganaderia. Estadísticas nacionales producción trigo. <http://www.sagar.gob.mx>

Salazar, Zazueta, A. (1989). Trigos para Panificación. Producción Comercialización y Calidad. Curso de capacitación del Programa Universitario de Alimentos UNAM. México, D.F.

Salazar, Zazueta, A. (1990). Características de calidad industrial de las variedades comerciales de trigos harineros. *Rev. Pan* 11:52-61

Schlesinger, J. (1963). Sedimentation studies (1962). *Crop New West Miller*. 268(6): 41-45

Schofield, D. J., Bottomley C. R., Timms F. M. y Booth R. M. (1983). The effect of heat on wheat gluten and the involvement of sulphhydryl-disulphide interchange reactions. *J. Cereal Sci.* 1:241-253

Serna, Saldivar O. R. S (1996). Química, Almacenamiento e Industrialización de los Cereales AGT editor México D.F.

Sexson, K.R. y WU,Y.V. (1972) Molecular weights of wheat gliadins in various solvents. *Biochim. Biophys. Acta* 263:651-656

Sibbitt, L. D. y Gilles, K. A.(1962). Sedimentation test as index of HRS wheat quality. Part I. Some effects on grinding. *Cereal Sci. Today*. 7(7):232-235

Simmonds, D. H. (1978). Structure, composition and bichemistry of cereal grain. pp105 in: Cereals'78: Better Nutrition for the World's Millions. 6 th: Int Cereal bread Congr., ed. Am. Assoc. Cereal, Chem. St. Paul. MN

Srivastava, K.A. y Haridas, R. P. (1994). Changes in fuctional characteristics of wheat during high temperatures storage. *J. Food Sci. Technol.* 31(1):36-39

SAS. Institute(1989). User's guide to SAS. SAS Institute Inc., Cary, North Carolina, U.S.A.

Strecker, T. D., Cavalieri R. P., Zollars R. L. y Pomeranz Y. (1995). Polymerization and mechanical degradation kinetics of gluten and glutenina at extruder melt-section temperatures and shear rates. *J. Food Sci.* 60:532-557

Tosi, E., Re, E., Catalano, O. y Cazzoli, A. (1982). Secado de trigo por lecho fluidizado. Influencia de las variables del proceso de secado en la calidad panadera de las harinas. *Aliment. Latinoam.* 16(133):61-68

Tosi, E., Re, E., Tapiz, L. y Masciarelli, R. (1985). Secado de trigo influencia de la temperatura final del grano, tiempo de residencia e intensidad de secado en la modificación de la calidad panadera. *Alimentaria.* 184: 77-82

Tosi, E., Re, E., Tapiz, L., y Masciarelli, R. (1985). Secado de trigo Influencia de la temperatura final del grano, tiempo de residencia e intensidad de secado en la modificación de la calidad panadera. *Rev. Agroquim. Tecnol. Aliment.* 28(2):130-135

Tosi E., Re E., Tapiz L., Macias S. y Ferreghini M. (1986). Secado de trigo en secaderos de flujo cruzado. Propiedades que modifica en el grano y en la harina. *Rev. Agroquím. Tecnol, Aliment.* 26(1):139-147

Tosi, E., Masciarelli, E. Tapiz, L. y Ciappini (1988). Secado de granos en lecho fluidizado. Fluidodinámica de lechos de soja, sorgo y triticale. *Rev. Agroquim. Tecnol. Aliment.* 28(2) 221-232

Vizcarra, M. M., Recio E. A., Vázquez Ch. L. y Ruíz M. R. (1998). Efecto del contenido de humedad y temperatura en la determinación de la difusividad del agua durante el secado de trigo en lecho fluidizado. Instituto Mexicano de Ingeniería Química. *Tecnol. Ciencia Educ.* 13(1-2):11-19

Wall, J. S. (1979) The role of weath proteins in determining baking quality. pp 275. In: Recent advances in the biochemistry of cereals. Academic Press: London

Watson, E. L. (1970) Effect of heat treatment upon the germination of wheat. *Can. J: Plant. Sci.* 50:107-109

Weegels, L. P., Verhock A. J., Groot A. M. G. y Hamer J. R. (1994). Effects of gluten of heating at different moisture contents. 1 Changes in functional properties. *J. Cereal Sci.* 19:31-38

Zahed, H. A., Zhu, X. J. y Grace, R. J. (1995). Modelling and simulation of batch and continuous fluidized bed dryers. *Drying Technol.* 13 (1,2):1-28

Zeleny, L., Doty, J. M y Kiber, W. E. (1963). Sedimentation as a measure of wheat quality. *Miller.* 2(19):268-276

9. ANEXO 1

Trigo Salamanca tres humedades diferentes (37.5, 25 y 17.5), temperaturas de 40, 60, 80 y 100°C y tiempos de 60 min en todos los casos

Curvas de secado de trigo Salamanca 37.5% humedad inicial diferentes temperaturas de secado (40,60,80 y 100°C) y tiempo de 60 min

Pérdida de humedad en función del tiempo y temperatura

Tabla A 1 1 Trigo Salamanca, 37.5% humedad inicial y temperatura 40°C

tiempo(min)	%humeda	t. entrada °C	t. lecho °C	t. b. seco °C	t. b. humedo °C
0	37.5	40	40	38	17.5
5	35	40	30	30	18.5
10	31	40	33	33.5	20
20	27	40	35	38.5	21.5
30	24	40	37	39.5	21.5
40	22	40	39	40	21.5
50	21	40	40	40	22.5
60	20	40	40	40	22.5

Tabla A.1.2.Trigo Salamanca, 37.5% humedad inicial y temperatura 60°C

tiempo(min)	%humeda	t. entrada °C	t. lecho °C	t. b. seco °C	t. b. humedo °C
0	37.5	60	60	59.5	29.5
5	33	60	54.5	49	29
10	30	60	55	54	30.5
20	25	60	58	58.5	32
30	21	60	60	60	34
40	18.5	60	60	60	35
50	17.8	60	60	60	35.5
60	17.4	60	60	60	36

Tabla A.1.3 Trigo Salamanca, 37.5% humedad inicial y temperatura 80°C

Tiempo(min)	%humeda	t. entrada °C	t. lecho °C	t. b. seco °C	t. b. humedo °C
0	37.5	80	80	75	43.5
5	32	80	65	60	39
10	28	80	74.5	65.5	43
20	23	80	76.5	74.5	47.5
30	18	80	78	78.5	49
40	16	80	80	80	51
50	15	80	80	80	51
60	14.5	80	80	80	51

Tabla A 1 4 Trigo Salamanca, 37.5% humedad inicial y temperatura 100°C

Tiempo(min)	%humeda	t. entrada °C	t. lecho °C	t. b. seco °C	t. b. humedo °C
0	37.5	100	100	95	60
5	31	100	78	72	46
10	27	100	90	82	55.5
20	19	100	98	90	54.5
30	15	100	100	95	57.5
40	12	100	100	96.5	59
50	11	100	100	97.5	60
60	10.5	100	100	97.5	60.5

Tabla A 1 5 trigo con humedad inicial de 37.5% y secado a diferentes temperaturas

t°C	Ecuaciones cuadráticas	R
40	$Y= 0.0055 x^2 - 0.609 x + 37.336$	0.9948
60	$Y= 0.007 x^2 - 0.7431 x + 36.986$	0.9955
80	$Y= 0.0083 x^2 - 0.8588 x + 36.593$	0.9948
100	$Y= 0.0102 x^2 - 1.0342 x + 36.53$	0.9952

Tabla A 1 6 trigo Salamanca 37.5% humedad inicial, dx/dt en función de pérdida humedad

Temp		40°C	60°C	80°C	100°C
	%humedad	dx/dt	dx/dt	Dx/dt	dx/dt
tiempo					
0	37.5	0.609	0.7431	0.8588	1.0342
5	35	0.554	0.6731	0.7758	0.9322
10	31	0.499	0.6031	0.6928	0.8302
20	27	0.389	0.4631	0.5268	0.6262
30	24	0.279	0.3231	0.3608	0.4222
40	22	0.169	0.1831	0.1948	0.2182
50	21	0.059	0.0431	0.0288	0.0142
60	20	-0.051	-0.0969	-0.1372	-0.1898

determinación valores de k.

Ecuación $-dx/dt = k x$

Líneas de tendencia valores de k

Tabla A 1 7 trigo con humedad inicial de 37.5% y secado a diferentes temperaturas (valores de k)

T°C	Ecuaciones lineales	R ²
40	$Y= 0.0345 x - 0.6258$	0.9105
60	$Y= 0.0377 x - 0.5757$	0.8934
80	$Y= 0.0393 x - 0.4902$	0.8796
100	$Y= 0.0406 x - 0.3413$	0.8716

Curvas de secado de trigo Salamanca 25.3 % humedad inicial diferentes temperaturas de secado (40,60,80 y 100°C) y tiempo de 60 min

Pérdida de humedad en función del tiempo y temperatura

Tabla A 1 8 Trigo Salamanca 25.3% humedad inicial y temperatura 40°C

Tiempo(min)	%humeda	t. entrada °C	t. lecho °C	t. b. seco °C	t. b. humedo °C
0	25.39	40	40	40	25.5
5	24	40	30	38	25
10	22.5	40	33	39	25.5
20	20.5	40	35	39.5	26
30	18.8	40	37	39.5	26
40	17.5	40	39	40	26.5
50	17	40	40	40	27
60	16.5	40	40	40	27

Tabla A 1 9 Trigo Salamanca 25.3% humedad inicial y temperatura 60°C

Tiempo(min)	%humeda	t. entrada °C	t. lecho °C	t. b. seco °C	t. b. humedo °C
0	25.39	60	60	58	36.5
5	23	60	55	50	32
10	21.5	60	58.55	54	33.5
20	18.5	60	60	56.5	36
30	16	60	60	56.5	36
40	14.4	60	60	58.5	37
50	13.8	60	60	59	37.5
60	13.5	60	60	59	37.5

Tabla A 1 10 Trigo Salamanca 25.3% humedad inicial temperatura 80°C

tiempo(min)	%humeda	t. entrada °C	t. lecho °C	t. b. seco °C	t. b. humedo °C
0	25.39	80	74.5	94.5	49
5	22	79.5	66.5	75	41
10	20.5	79.5	73.5	82.5	44.5
20	16	80.5	77.5	87	47
30	13.5	80	79.5	88	47
40	11.8	80.5	79.5	87.5	48.5
50	11.4	80	79.5	87.5	49
60	10.6	80	79.5	87.5	49

COORDINACIÓN DE SERVICIOS
 DOCUMENTALES - BIBLIOTECA

Tabla A 1 11 Trigo Salamanca 25.3% humedad inicial temperatura 100°C

tiempo(min)	%humeda	t. entrada °C	t. lecho °C	t. b. seco °C	t. b. humedo °C
0	25.39	100	100	98.5	60
5	21	100	75	83	51.5
10	19	100	78	89	57
20	14	100	80	94	61.5
30	11	100	85	97	61.5
40	9.5	100	90	98.5	65
50	9	100	95	99	66
60	8	100	100	99	66.5

Tabla A 1.12 trigo con humedad inicial de 25.3% y secado a diferentes temperaturas

T°C	Ecuaciones cuadráticas	R
40	$Y=0.0024 x^2 - 0.2914 x + 25.332$	0.9991
60	$Y=0.0037 x^2 - 0.4175 x + 25.248$	0.9991
80	$Y=0.0049 x^2 - 0.5301 x + 25.018$	0.9951
100	$Y=0.0061 x^2 - 0.6318 x + 24.675$	0.9921

Tabla A 1 13 trigo Salamanca 25.3% humedad inicial, dx/dt en función de pérdida de %humedad

Temp.	40°C	60°C	80°C	100°C
tiempo	dx/dt	dx/dt	dx/dt	dx/dt
0	0.2914	0.4175	0.5301	0.6318
5	0.2674	0.3805	0.4811	0.5718
10	0.2434	0.3435	0.4321	0.5118
20	0.1954	0.2695	0.3341	0.3918
30	0.1474	0.1955	0.2361	0.2718
40	0.0994	0.1215	0.1381	0.1518
50	0.0514	0.0475	0.0401	0.0318
60	0.0034	-0.0265	-0.0579	-0.0882

determinación de valores de k

Ecuación $-dx/dt = k x$

Líneas de tendencia valores de k

Tabla A 1 14 trigo con humedad inicial de 25.3% y secado a diferentes temperaturas (valores de k)

T°C	Ecuaciones	R
40	$Y=0.0301 x-0.4474$	0.9332
60	$Y=0.0339 x-0.3999$	0.9165
80	$Y=0.0364 x-0.3305$	0.8968
100	$Y=0.0382 x-0.2489$	0.8812

Curvas de secado de trigo Salamanca 17.4% humedad inicial diferentes temperaturas de secado (40,60,80 y 100°C) y tiempo de 60 min
Pérdida de humedad en función del tiempo y temperatura

Tabla A 1 15 Trigo Salamanca 17.4% humedad inicial temperatura 40°C

tiempo(min)	%humeda	t. entrada °C	t. lecho °C	t. b. seco °C	t. b. humedo °C
0	17.4	40	40	40	35.5
5	16.5	40	30	36	27
10	16	40	35	38.5	30
20	14.5	40	39	38	29
30	13.5	40	40	38	29.5
40	12.5	40	40	38	29.5
50	12	40	40	38	29.5
60	11.5	40	40	38	29.5

Tabla A 1 16 Trigo Salamanca 17.4% humedad inicial Temperatura 60°C

tiempo(min)	%humeda	t. entrada °C	t. lecho °C	t. b. seco °C	t. b. humedo °C
0	17.4	60	60	58	36.5
5	16	60	57	50	31.5
10	15	60	53	54	35
20	14	60	55	56	37.5
30	12.5	60	58	57	38.5
40	11.5	60	60	57.5	39
50	10.8	60	60	58	40
60	10.5	60	60	58.5	40

Tabla A 1 17 Trigo Salamanca 17.4% humedad inicial temperatura 80°C

tiempo(min)	%humeda	t. entrada °C	t. lecho °C	t. b. seco °C	t. b. humedo °C
0	17.4	80	80	79	53.5
5	15.5	80	68.5	63.5	41.5
10	14.5	80	77.5	70.5	45
20	13	80	79	76.5	48.5
30	11.5	80	80	77.5	50
40	10.5	80	80	78	50
50	10	80	80	79	51
60	9	80	80	79	51.5

Tabla A 1 18 Trigo Salamanca 17.4% humedad inicial temperatura 100°C

tiempo(min)	%humeda	t. entrada °C	t. lecho °C	t. b. seco °C	t. b. humedo °C
0	17.4	100	100	95	38.5
5	15	100	80	81.5	52.5
10	14	100	85	88	55.5
20	12	100	90	94.5	59.5
30	10	100	93	96	62
40	9	100	95	97	62
50	8	100	99	97.5	62.5
60	7.5	100	100	97.5	62.5

Tabla A 1 19 trigo con humedad inicial de 17.5% y secado a diferentes temperaturas

T°C	Ecuaciones cuadráticas	R
40	$Y= 0.0011 x^2-0.1643 x+17.393$	0.9987
60	$Y= 0.0015 x^2-0.201 x+17.117$	0.9943
80	$Y= 0.0018 x^2-0.2337 x+16.949$	0.9904
100	$Y= 0.0024 x^2-0.301 x+16.932$	0.9937

Tabla A 1 20 Salamanca 17.4% humedad inicial, dx/dt en función de pérdida de %humedad

Temp..	40°C	60°C	80°C	100°C
tiempo	dx/dt	dx/dt	dx/dt	dx/dt
0	0.1643	0.201	0.2337	0.301
5	0.1533	0.186	0.2157	0.277
10	0.1423	0.171	0.1977	0.253
20	0.1203	0.141	0.1617	0.205
30	0.0983	0.111	0.1257	0.157
40	0.0763	0.081	0.0897	0.109
50	0.0543	0.051	0.0537	0.061
60	0.0323	0.021	0.0177	0.013

determinación de valores de k

Ecuación $-dx/dt = k x$

Líneas de tendencia valores de k

Tabla A 1 21 trigo con humedad inicial de 17.5% y secado a diferentes temperaturas (valores de k)

T°C	Ecuaciones	R
40	$Y= 0.0214 x - 0.1989$	0.9676
60	$Y= 0.0252 x - 0.2104$	0.9509
80	$Y= 0.0260 x - 0.193$	0.9456
100	$Y= 0.0283 x - 0.1568$	0.9363

Ley de Arrhenius permite relacionar K con temperatura en grados kelvin por lo tanto

$$k = k_0 e^{-E/RT}$$

Tabla A 1 22 valores de k

	37.5%hi	25%hi	17%hi
T°C	K	K	k
40	0.0345	0.0301	0.0214
60	0.0377	0.0339	0.0252
80	0.0392	0.0364	0.0260
100	0.0406	0.0382	0.0283

$$\ln k = \ln k_0 - \frac{E}{R} \left(\frac{1}{T} \right)$$

Tabla A 1 23 Valores ln K en función de 1/T °K

		37.5%hi	25%hi	17%hi
T°C	1/T°K ⁻¹	lnk	lnk	lnk
100°C	0.00268	-3.2039	-3.2649	-3.5648
80	0.00286	-3.2390	-3.3131	-3.6496
60	0.003	-3.2781	-3.3843	-3.6809
40	0.00319	-3.3668	3.5032	-3.8443

Tabla A 1 24 valores de E/RT

%humedadi	Ecuaciones	R
17	-526.61x-2.1406	0.9436
25	-471.33x-1.9892	0.9657
35	-316.79 x -0.3413	0.9408

$$E = k(RT)$$

$$R = 8.314 \text{ kJ/kgmol}^\circ\text{k}$$

Trigo Oasis, tres humedades diferentes (37.5, 25 y 17.5) temperaturas de 40, 60, 80 y 100°C y tiempo de 60 min en todos los casos

Curvas de secado trigo Oasis 37.5 % humedad inicial diferentes temperaturas de secado (40, 60, 80 y 100°C) y tiempos de 60 min

Pérdida de humedad en función del tiempo

Tabla A 1 25 Trigo Oasis 37.5% humedad inicial y temperatura 40°C

tiempo (min)	%humedad	t. entrada °C	t. lecho °C	t. b. seco °C	t. b. humedo °C
0	37.5	40	40	38	25
5	35	40	32	29	22
10	33	40	38	34	25
20	30	40	39.5	36	25.5
30	27	40	40	36.5	25.5
40	25.5	40	40	37	26
50	24.5	40	40	37	26
60	24	40	40	37	26

Tabla A 1 26 Trigo Oasis 37.5% humedad inicial temperatura 60°C

tiempo (min)	%humedad	t. entrada °C	t. lecho °C	t. b. seco °C	t. b. humedo °C
0	37.5	60	60	58.5	37
5	34	60	49.5	42	29
10	32	60	53.5	47	31.5
20	28	60	58	50.5	33
30	24.5	60	60	54.5	36.5
40	22.5	60	60	56.5	38
50	21.5	60	60	58	38
60	21	60	60	58	38

Tabla A 1 27 Trigo Oasis 37.5%humedad inicial temperatura 80°C

tiempo (min)	%humedad	t. entrada °C	t. lecho °C	t. b. seco °C	t. b. humedo °C
0	37.5	80	80	77.5	46.5
5	33	80	55.5	57.5	38
10	31	80	67.5	63	40.5
20	26	80	75.5	71.5	48
30	22	80	79.5	74.5	46
40	19	80	80	76	47
50	18.5	80	80	76.5	47.5
60	18	80	80	76.5	47.5

Tabla A 1 28 Trigo Oasis 37.5% humedad inicial temperatura 100°C

tiempo (min)	%humedad	t. entrada °C	t. lecho °C	t. b. seco °C	t. b. humedo °C
0	37.5	100	100	87	49
5	32	100	68	65	42
10	29	100	85.5	76.5	47
20	23	100	98	88.5	52
30	18.5	100	100	92.5	55
40	16	100	100	96	56
50	14.5	100	100	97	56
60	14	100	100	97	56

Tabla A 1 29 trigo con humedad inicial de 37.5 y secado a diferentes temperaturas

T°C	Ecuaciones cuadráticas	R
40	$0.0039x^2 - 0.4535x + 37.314$	0.9989
60	$0.005x^2 - 0.5671x + 37.168$	0.9984
80	$0.0063x^2 - 0.693x + 37.087$	0.9469
100	$0.0077x^2 - 0.8365x + 36.744$	0.9972

Tabla A 1 30 trigo Oasis 37.5% humedad inicial dx/dt en función de %humedad Temp.

	40°C	60°C	80°C	100°C
Temp.	dx/dt	dx/dt	dx/dt	dx/dt
Tiempo				
0	0.4535	0.5671	0.693	0.8355
5	0.4145	0.5171	0.63	0.7585
10	0.3755	0.4671	0.567	0.6815
20	0.2975	0.3671	0.441	0.5275
30	0.2195	0.2671	0.315	0.3735
40	0.1415	0.1671	0.189	0.2195
50	0.0635	0.0671	0.063	0.0655
60	-0.0145	-0.0329	-0.063	-0.0885

determinación de valores de k

Ecuación $-dx/dt=kx$

Líneas de tendencia valores de k

Tabla A 1 31 trigo con humedad inicial de 37.5 y secado a diferentes temperaturas (valores de k)

T°C	ecuaciones	R
40	$0.0324x - 0.715$	0.923
60	$0.0334x - 0.6256$	0.9188
80	$0.0352x - 0.5466$	0.9083
100	$0.0361x - 0.4108$	0.9023

Curvas de secado trigo Oasis 25.5 % humedad inicial diferentes temperaturas de secado (40, 60, 80 y 100°C) y tiempos de 60 min

Pérdida de humedad en función del tiempo

Tabla A 1 32 Trigo Oasis 25.5% humedad inicial y temperatura 40°C

tiempo (min)	%humedad	t. entrada °C	t. lecho °C	t. b. seco °C	t. b. humedo °C
0	25.5	40	40	38	23.5
5	23.5	40	30	36	20.5
10	22.5	40	32	38	22.5
20	20.5	40	35	38	22.5
30	19.5	40	37	39	22.5
40	18.5	40	40	39	22.5
50	17.5	40	40	39	22.5
60	17	40	40	40	23

Tabla A 1 33 Trigo Oasis 25.5% humedad inicial temperatura 60°C

tiempo (min)	%humedad	t. entrada °C	t. lecho °C	t. b. seco °C	t. b. humedo °C
0	25.5	60	60	57	30
5	23	60	50	46.5	23.5
10	22	60	53	52	26
20	20	60	55	56	27
30	17.3	60	58	56.5	27
40	16	60	60	57.5	28.5
50	15.5	60	60	58.5	28.5
60	15	60	60	60	29

Tabla A 1 34 Trigo Oasis 25.5% humedad inicial temperatura 80°C

tiempo (min)	%humedad	t. entrada °C	t. lecho °C	t. b. seco °C	t. b. humedo °C
0	25.5	80	80	75.5	35
5	22.5	80	67.5	59.5	32
10	21.5	80	78.5	66	34
20	18.5	80	80	79.5	37
30	16	80	80	76.5	38
40	14.5	80	80	78	39
50	14	80	80	79	39.5
60	13.5	80	80	79.5	40

Tabla A 1 35 Trigo Oasis 25.5% humedad inicial temperatura 100°C

tiempo (min)	%humedad	t. entrada °C	t. lecho °C	t. b. seco °C	t. b. humedo °C
0	25.5	100	100	85	40.5
5	22	100	72	72.5	38.5
10	20	100	80	81	40.5
20	17.5	100	85	91	44
30	14.5	100	90	94.5	45
40	13.5	100	96	96.5	48.5
50	12.5	100	100	97.5	48.5
60	12	100	100	98	48.5

Tabla A 1 36 trigo con humedad inicial de 25.5 y secado a diferentes temperaturas

T°C	Ecuaciones cuadráticas	R
40	$0.002x^2 - 0.2509x + 25.027$	0.9901
60	$0.0029x^2 - 0.3405x + 25.167$	0.9934
80	$0.0036x^2 - 0.409x + 25.093$	0.9949
100	$0.0042x^2 - 0.4594x + 24.746$	0.9904

Tabla A 1 37 trigo Oasis 25.5% humedad inicial dx/dt en función de %humedad Temp..

Temp..	40°C	60°C	80°C	100°C
	dx/dt	dx/dt	dx/dt	dx/dt
tiempo				
0	0.2509	0.3405	0.409	0.4594
5	0.2309	0.3115	0.373	0.4174
10	0.2109	0.2825	0.337	0.3754
20	0.1709	0.2245	0.265	0.2914
30	0.1309	0.1665	0.193	0.2074
40	0.0909	0.1085	0.121	0.1234
50	0.0509	0.0505	0.049	0.0394
60	0.0109	-0.0075	-0.023	-0.0446

determinación de valores de k

Ecuación $-dx/dt=kx$

Líneas de tendencia valores de k

Tabla A 1 38 trigo con humedad inicial de 25.5% y secado a diferentes temperaturas (valores de k)

T°C	ecuaciones	R
40	$0.0279x - 0.4309$	0.9356
60	$0.0311x - 0.4154$	0.926
80	$0.0335x - 0.3961$	0.9196
100	$0.0354x - 0.374$	0.8995

Curvas de secado trigo Oasis 17.5 % humedad inicial diferentes temperaturas de secado (40, 60, 80 y 100°C) y tiempos de 60 min Pérdida de humedad en función del tiempo

Tabla A 1 39 Trigo Oasis 17.5% humedad inicial y temperatura 40°C

tiempo (min)	%humedad	t. entrada °C	t. lecho °C	t. b. seco °C	t. b. humedo °C
0	17.5	40	40	39.5	21.5
5	17	40	35	33.5	19
10	16.5	40	37	36	20
20	15.5	40	39	37.5	20
30	14.4	40	39	38.5	20.5
40	14	40	40	38.5	21
50	13.4	40	40	38.5	21
60	13	40	40	38.5	21

Tabla A 1 40 Trigo Oasis 17.5% humedad inicial temperatura 60°C

tiempo (min)	%humedad	t. entrada °C	t. lecho °C	t. b. seco °C	t. b. humedo °C
0	17.5	60	60	56.5	35.5
5	16.5	60	47	46.5	33.5
10	16	60	54.5	52.5	34.5
20	14.5	60	55	55.5	36
30	13.5	60	57.5	57	36.5
40	12.5	60	59.5	57.5	37
50	12	60	59.5	58.5	37
60	11.5	60	59.5	58.5	37

Tabla A 1 41 Trigo Oasis 17.5% humedad inicial temperatura 80°C

tiempo (min)	%humedad	t. entrada °C	t. lecho °C	t. b. seco °C	t. b. humedo °C
0	17.5	80	80	74.5	37.5
5	16	80	70.5	66	33
10	15	80	72.5	74.5	34
20	13.5	80	79.5	76.5	35.5
30	12.5	80	80	78	36
40	11	80	80	79	36
50	10.4	80	80	80	36
60	10	80	80	80	36

Tabla A 1 42 Trigo Oasis 17.5% humedad inicial temperatura 100°C

tiempo (min)	%humedad	t. entrada °C	t. lecho °C	t. b seco °C	t. b humedo °C
0	17.5	100	100	87.5	33.5
5	15.5	100	74.5	67	33.5
10	14.5	100	88	84.5	36
20	13	100	90	89	38.5
30	11	100	95	92.5	40
40	9.5	100	99	95	40
50	9	100	100	96.5	40.5
60	8.5	100	100	96.5	40.5

Tabla A 1 43 trigo con humedad inicial de 17.5% y secado a diferentes temperaturas

T°C	Ecuaciones cuadráticas	R
40	$0.0008x^2 - 0.1221x + 17.566$	0.997
60	$0.0012x^2 - 0.168x + 17.449$	0.9988
80	$0.0016x^2 - 0.2174x + 17.237$	0.9947
100	$0.0021x^2 - 0.2706x + 17.192$	0.9936

Tabla A 1 44 trigo Oasis 17.5% humedad inicial dx/dt en función de %humedad Temp.. 40°C 60°C 80°C 100°C

	Dx/dt	Dx/dt	Dx/dt	Dx/dt
Tiempo				
0	0.1221	0.168	0.2174	0.2706
5	0.1141	0.156	0.2014	0.2496
10	0.1061	0.144	0.1854	0.2286
20	0.0901	0.12	0.1534	0.1866
30	0.0741	0.096	0.1214	0.1446
40	0.0581	0.072	0.0894	0.1026
50	0.0421	0.048	0.0574	0.0606
60	0.0261	0.024	0.0254	0.0186

determinación de valores de k

Ecuación $-dx/dt=kx$

Líneas de tendencia valores de k

Tabla A 1 45 trigo con humedad inicial de 17.5 y secado a diferentes temperaturas (valores de k)

T°C	Ecuaciones	R
40	$0.0202x - 0.2268$	0.9712
60	$0.0231x - 0.2251$	0.9652
80	$0.0248x - 0.1968$	0.9438
100	$0.0268x - 0.1725$	0.9845

Ley de Arrhenius permite relacionar k con temperatura en grados kelvin por lo tanto

$$K = k_0 e^{-E/RT}$$

Tabla A 1 46 Valores de k

T °C	37.5%hi	25%hi	17%hi
40	0.0324	0.0279	0.202
60	0.0334	0.0311	0.0231
80	0.0352	0.0335	0.0246
100	0.0361	0.0354	0.0268

$$\ln k = \ln k_0 - \frac{E}{R} \left(\frac{1}{T} \right)$$

Tabla A 1 47 Valores de lnk en función de 1/T (°k)⁻¹

T °C	T°k ⁻¹	37.5%hi	25%hi	17%hi
100	0.00268	-3.3214	-3.3410	-3.61935
80	0.00286	-3.3467	-3.3962	-3.7050
60	0.003	-3.3991	-3.4705	-3.7679
40	0.00319	-3.4295	-3.5791	-3.9020

Tabla A 1 48 Valores de (pendiente) E/RT

%hi	Ecuaciones	R
17	-551.92x + 2.1281	0.9845
25	-472.21x + 2.062	0.9802
37	-223.62x + 2.7185	0.9663

$$E = k (RT)$$

$$R = 8.314 \text{ kJ/kgmol}^\circ\text{k}$$

Trigo Salamanca 15% humedad inicial temperaturas de 40, 60, 70, 80 y 100°C y diferentes tiempos (hasta alcanzar una humedad final de entre 11y 8%)

Tabla A 1 49 trigo Salamanca 15% humedad inicial temperatura 40°C

tiempo (min)	%humedad	t. entrada °C	t. lecho °C	t. bulbo. S °C	t. bulbo. H °C
0	15.4	40	40	38	30
5	15	40	35	32	28
10	14.5	40	36	31	27
15	14	40	37	33	27
20	13.8	40	37	34	27
25	13.6	40	38	35	27
30	13.2	40	38	36	27
35	13	40	38	36	27
40	12.8	40	38	36	28
45	12.6	40	38	36	28
50	12.4	40	38	36	28
55	12.2	40	38	36	28
60	12	40	38	36	28
70	11.6	40	39	36	28
80	11.2	40	39	36	29
90	10.9	40	39	36	29
100	10.4	40	39	36	29
110	10.2	40	39	36	29
120	10	40	39	36	30
130	9.6	40	39	36	30
140	9.4	40	39	36	30
150	9.3	40	39	36	30
160	9.2	40	39	36	30
170	9.1	40	39	36	30
180	9	40	39	36	30
190	8.9	40	39	36	30
200	8.8	40	39	36	30
210	8.7	40	40	36	30
220	8.6	40	40	36	30
230	8.5	40	40	36	30
240	8.4	40	40	36	30

Tabla A 1 50 trigo Salamanca 15% humedad inicial temperatura 60°C

tiempo (min)	%humedad	t. entrada °C	t. lecho °C	t. bulbo. S °C	t. bulbo. H °C
0	15.4	60	60	58	34
5	15	60	59	53	30
10	14.5	60	55	49	29
15	14	60	56	52	31
20	13.4	60	56	52	32
25	13	60	56	53	32
30	12.6	60	57	53	32
35	12.2	60	57	53	33
40	11.8	60	57	53	33
45	11.4	60	58	53	33
50	11	60	58	53	33
55	10.8	60	58	53	33
60	10.4	60	58	53	33
70	10	60	58	53	33
80	9.4	60	58	53	34
90	9	60	58	53	34
100	8.8	60	58	53	34
110	8.7	60	60	53	34
120	8.6	60	60	53	34
130	8.5	60	60	53	34
140	8.4	60	60	53	34

Tabla A 1 51 trigo Salamanca 15% humedad inicial temperatura 70°C

tiempo (min)	%humedad	t. entrada °C	t. lecho °C	t. bulbo. S °C	t. bulbo. H °C
0	15.4	70	70	60	34
5	14.6	70	55	50	30
10	14	70	60	55	29
15	13.2	70	64	57	29
20	12.4	70	67	58	30
25	12	70	68	59	31
35	11	70	68	60	32
40	10.6	70	68	62	33
45	10.2	70	69	64	34
50	9.8	70	69	65	36
55	9.5	70	69	67	37
60	9.3	70	70	68	37
70	9	70	70	69	37
80	8.7	70	70	69	37
90	8.4	70	70	69	37

Tabla A 1 52 trigo Salamanca 15% humedad inicial temperatura 80°C

tiempo (min)	%humedad	t. entrada °C	t. lecho °C	t. bulbo. S °C	t. bulbo. H °C
0	15.4	80	80	60	40
5	14.2	80	60	45	27
10	13.4	80	70	51	27
15	12.6	80	73	62	27
20	11.6	80	73	65	28
25	11	80	73	67	29
30	10.4	80	75	68	32
35	9.8	80	75	70	34
40	9.4	80	78	71	35
45	9	80	78	72	37
50	8.4	80	79	75	38

Tabla A 1 53 trigo Salamanca 15% humedad inicial temperatura 100°C

tiempo (min)	%humedad	t. entrada °C	t. lecho °C	t. bulbo. S °C	t. bulbo. H °C
0	15.4	100	100	90	70
5	13.8	100	80	70	49
10	12.5	100	85	75	46
15	11.5	100	90	80	47
20	10	100	95	85	48
25	9	100	98	90	49
30	8.4	100	100	98	49

**Tabla A 1 54 trigo con humedad inicial 15%
y secado a diferentes temperaturas y tiempos**

T°C	Ecuaciones cuadrática	R
40	$Y=0.0001x^2-0.0581x + 15.018$	0.996
60	$Y=0.0004x^2 - 0.1093x + 15.483$	0.9992
70	$Y=0.0009x^2 - 0.1536x + 15.336$	0.9983
80	$Y=0.0014x^2 - 0.2079x + 15.315$	0.9984
100	$Y=0.0026x^2 - 0.315x + 15.308$	0.997

Tabla A 1 55 Curvas de secado trigo Salamanca 15% humedad inicial y diferentes tiempos y temperaturas **dx/dt en función del %humedad**

Temperatura	40°C	60°C	70°C	80°C	100°C
Tiempo	Dx/dt	Dx/dt	Dx/dt	Dx/dt	Dx/dt
0	0.0581	0.1093	0.1536	0.2079	0.315
5	0.0571	0.1053	0.1446	0.1939	0.289
10	0.0561	0.1013	0.1356	0.1799	0.263
15	0.0551	0.0973	0.1266	0.1659	0.237
20	0.0541	0.0933	0.1176	0.1519	0.211
25	0.0531	0.0893	0.1086	0.1379	0.185
30	0.0521	0.0853	0.0996	0.1239	0.159
35	0.0511	0.0813	0.0906	0.1099	
40	0.0501	0.0773	0.0816	0.0959	
45	0.0491	0.0733	0.0726	0.0819	
50	0.0481	0.0693	0.0636	0.0679	
55	0.0471	0.0653	0.0546		
60	0.0461	0.0613	0.0456		
70	0.0441	0.0533	0.0276		
80	0.0421	0.0453	0.0096		
90	0.0401	0.0373			
100	0.0381	0.0293			
110	0.0361	0.0213			
120	0.0341	0.0133			
130	0.0321	0.0053			
140	0.0301	-0.0027			
150	0.0281				
160	0.0261				
170	0.0241				
180	0.0221				
190	0.0201				
200	0.0181				
210	0.0161				
220	0.0141				
230	0.0121				
240	0.0101				

determinación de valores de k
 Ecuación $-dx/dt = kx$

Tabla A 1 56 **Lineas de tendencia valores de k**
 Ecuaciones lineales derivadas de las curvas de secado del trigo con humedad inicial de 15% y secado a diferentes temperaturas (valores de k)

T°C		R ²
40	0.0066 x - 0.0364	0.9196
60	0.0146 x - 0.0967	0.854
70	0.0182 x - 0.1104	0.9043
80	0.0196x - 0.0773	0.9338
100	0.0212 x - 0.00008	0.9589

Ley de Arrhenius permite relacionar k con temperatura en grados kelvin por lo tanto

$$K = k_0 e^{-E/RT}$$

Tabla A 1 57 Valores de k

T°C	K
40	0.0666
60	0.0146
70	0.0182
80	0.0196
100	0.0212

$$\ln k = \ln k_0 - \frac{E}{R} \left(\frac{1}{T} \right)$$

Tabla A 1 58 Valores de ln k en función de 1/T°k

T°C	t°K ⁻¹	Lnk
100	0.00268	-3.85375
80	0.00286	-3.93222
70	0.00291	-4.00633
60	0.00300	-4.22673
40	0.00319	-5.02069

Valores de E/RT (pendiente)

$$Y = -2279.1x + 2.4485 \quad R^2 = 0.8446$$

E k(RT)

$$R = 8.314 \text{ kJ/kgmol}^\circ\text{k}$$

Curvas de secado de trigo Salamanca 20 % humedad inicial diferentes temperaturas (40, 60, 70 80 y 100 °C) y tiempos de secado hasta que el trigo tenga una humedad final de entre 10.4%

Pérdida de humedad en función del tiempo

Tabla A 1. 59 Trigo Salamanca 20% humedad inicial temperatura 40°C

tiempo (mi)	humedad	t. entrada °C	t. lecho °C	T. bulbo. s °C	T bulbo. h °C
0	20	40	40	35	28
5	19	40	38	33	28
10	18.5	40	37	31	27
15	18	40	36	31	27
20	17.8	40	36	32	28
25	17.4	40	38	33	28
30	17	40	39	34	29
35	16.6	40	40	34	29
40	16.4	40	40	35	29
45	15.8	40	40	35	30
50	15.7	40	40	35	30
55	15.4	40	40	35	30
60	15	40	40	35	30
70	14.6	40	40	35	30
80	14	40	40	35	30
90	13.6	40	40	35	30
100	13	40	40	35	30
110	12.6	40	40	35	30
120	12	40	40	35	30
130	11.8	40	40	35	30
140	11.4	40	40	35	30
150	11.3	40	40	35	30
160	11.2	40	40	35	30
170	11	40	40	35	30
180	10.9	40	40	35	30
190	10.8	40	40	35	30
200	10.7	40	40	35	30
210	10.6	40	40	35	30
220	10.5	40	40	35	30
230	10.4	40	40	35	30
240	10.3	40	40	35	30

Tabla A 1. 60 Trigo Salamanca 20% humedad inicial temperatura 60°C

tiempo (mi)	humedad	t. entrada °C	t. lecho °C	T. bulbo. s °C	T bulbo. h °C
0	20	60	60	50	29
5	18.6	60	47	40	29
10	18	60	51	45	27
15	17.2	60	55	46	28
20	16.4	60	57	46	29
25	15.8	60	58	46	30
30	15.2	60	58	46	30
35	14.6	60	59	46	30
40	14	60	59	47	30
45	13.6	60	60	47	30
50	13.2	60	60	47	30
55	12.9	60	60	47	31
60	12.4	60	60	48	31
70	11.8	60	60	49	31
80	11.2	60	60	49	31
90	11	60	60	50	31
100	10.9	60	60	52	31
110	10.8	60	60	53	31
120	10.6	60	60	54	31
130	10.5	60	60	55	31
140	10.4	60	60	56	31

Tabla A 1. 61 Trigo Salamanca 20% humedad inicial temperatura 70°C

tiempo (mi)	humedad	t. entrada °C	t. lecho °C	T. bulbo. s °C	T bulbo. h °C
0	20				
5	18.2	70	60	50	31
10	17.4	70	55	48	28
15	16.4	70	59	49	30
20	15.6	70	62	55	31
25	14.8	70	64	58	32
30	13.6	70	66	60	35
35	13	70	66	61	35
40	12.4	70	68	63	36
45	11.8	70	70	63	36
50	11.4	70	70	65	38
55	11.2	70	70	65	38
60	11	70	70	65	38
70	10.8	70	70	67	39
80	10.4	70	70	67	39

Tabla A 1. 62 Trigo Salamanca 20% humedad inicial temperatura 80°C

tiempo (mi)	humedad	t. entrada °C	t. lecho °C	T bulbo. s °C	T bulbo. h °C
0	20	80	80	70	35
5	18	80	60	45	30
10	17	80	70	47	29
15	15.8	80	70	52	30
20	14.8	80	73	55	32
25	13.8	80	75	57	34
30	13	80	78	59	37
35	12	80	78	61	38
40	11.4	80	78	63	39
45	11	80	78	64	39
50	10.4	80	78	65	39

Tabla A 1. 63 Trigo Salamanca 20% humedad inicial temperatura 100°C

tiempo (mi)	humedad	t. entrada °C	t. lecho °C	T. bulbo. s °C	T bulbo. h °C
0	20	100	100	85	40
5	17.8	100	75	51	39
10	16	100	90	68	35
15	14.2	100	95	70	36
20	12.8	100	95	75	38
25	11.6	100	100	80	38
30	10.4	100	100	80	39

Tabla A 1 64 trigo con humedad inicial 20% secado a diferentes temperaturas y tiempos

T°C	Ecuaciones cuadráticas	R
40	$0.0002x^2 - 0.0833x + 19.4$	0.9969
60	$0.0007x^2 - 0.1579x + 19.445$	0.9941
70	$0.0014 x^2 - 0.2208x + 19.552$	0.9939
80	$0.0022 x^2 - 0.2944x + 19.751$	0.9978
100	$0.0042x^2 - 0.4429x + 19.967$	0.9872

Tabla A 1. 65 Curvas de secado trigo Salamanca 20% humedad inicial dx/dt en función de pérdida de humedad

	Temperatura	40°C	60°C	70°C	80°C	100°C
		dx/dt	dx/dt	dx/dt	dx/dt	dx/dt
tiempo (min)	% humedad					
0	20	0.0833	0.1579	0.2208	0.2944	0.4429
5	19	0.0813	0.1509	0.2068	0.2724	0.4009
10	18.5	0.0793	0.1439	0.1928	0.2504	0.3589
15	18	0.0773	0.1369	0.1788	0.2284	0.3169
20	17.5	0.0753	0.1299	0.1648	0.2064	0.2749
25	17	0.0733	0.1229	0.1508	0.1844	0.2329
30	16.5	0.0713	0.1159	0.1368	0.1624	0.1909
35	16	0.0693	0.1089	0.1228	0.1404	
40	15.5	0.0673	0.1019	0.1088	0.1184	
45	15	0.0653	0.0949	0.0948	0.0964	
50	14.5	0.0633	0.0879	0.0808	0.0744	
55	14.2	0.0613	0.0809	0.0668		
60	14	0.0593	0.0739	0.0528		
70	13.8	0.0553	0.0599	0.0248		
80	13.6	0.0513	0.0459	-0.0032		
90	13.4	0.0473	0.0319			
100	13.2	0.0433	0.0179			
110	13	0.0393	0.0039			
120	12.8	0.0353	-0.0101			
130	12.6	0.0313	-0.0241			
140	12.4	0.0273	-0.0381			
150	12.2	0.0233				
160	12	0.0193				
170	11.8	0.0153				
180	11.6	0.0113				
190	11.4	0.0073				
200	11.2	0.0033				
210	11	-0.0007				
220	10.8	-0.0047				
230	10.6	-0.0087				
240	10.4	-0.0127				

determinación de valores de k

Ecuación $-dx/dt= kx$

Líneas de tendencia valores de k

Tabla A 1 66 Ecuaciones lineales derivadas de las curvas de secado del trigo con humedad inicial del 20% y secado a diferentes temperaturas (valores de k)

T°C	Ecuaciones cuadráticas	R
40	$Y= 0.0098x - 0.09$	0.9114
60	$Y=0.0186x - 0.1808$	0.8528
70	$Y=0.021x - 0.1717$	0.8994
80	$Y=0.0231x - 0.1445$	0.971
100	$Y=0.0261x -0.0595$	0.9681

Ley de Arrhenius permite relacionar k con temperatura en grados kelvin por lo tanto

$K=k_0e^{-E/RT}$

Tabla A 1 67 Valores de k

T°C	K
40	0.0098
60	0.0186
70	0.021
80	0.0231
100	0.0261

$\ln k = \ln k_0 - \frac{E}{R} \left(\frac{1}{T} \right)$

Tabla A 1 68 Valores de ln k en función de 1/T °K

T °C	T °K	Lnk
100	0.00268	-3.64582
80	0.00286	-3.77226
70	0.002915	-3.86323
60	0.003	-3.98459
40	0.00319	-4.65646

Valores de pendiente E/RT

$Y=-1937.4x + 1.68813$ $R^2=0.8828$

$E= k(RT)$

$R= 8.314 \text{ kj/kgmol}^\circ\text{k}$

Cinética de secado Trigo Oasis 15% humedad temperaturas de 40, 60, 70, 80 y 100°C y diferentes tiempos de secado Curvas de secado de trigo Oasis 15% h inicial diferentes temperaturas y tiempos de secado curvas de secado pérdida de humedad.en función de tiempo

Tabla A 1 69 Trigo Oasis 15% humedad inicial temperatura 40°C

tiempo (min)	%humedad	t. entrada °C	t. lecho °C	t. bulbo. seco °C	t. bulbo. humedo °C
0	15.129	40	40	37	32
5	14.8	40	37	35	31
10	14.6	40	35	33	30
15	14.4	40	36	33	31
20	14.2	40	38	34	31
25	14	40	39	34	31
30	13.8	40	39	34	31
35	13.6	40	39	35	31
40	13.4	40	39	35	32
45	13.2	40	39	35	32
50	13	40	39	35	32
55	12.8	40	39	35	32
60	12.7	40	39	35	32
70	12.4	40	39	35	32
80	12.1	40	39	35	32
90	11.8	40	39	35	32
100	11.6	40	39	35	32
110	11.4	40	39	35	32
120	11.2	40	39	35	32
130	11	40	39	35	32
140	10.8	40	39	35	32
150	10.6	40	39	35	32
160	10.4	40	39	35	32
170	10.2	40	39	35	33
180	10.15	40	39	35	33
190	10.1	40	39	35	33
200	10.05	40	39	35	33
210	10	40	39	35	33
220	9.95	40	39	35	33
230	9.9	40	39	35	33
240	9.85	40	39	35	33

Tabla A 1 70 Trigo Oasis 15% humedad inicial temperatura 60°C

tiempo (min)	%humedad	t. entrada °C	t. lecho °C	t. bulbo. Seco °C	t. bulbo. humedo °C
0	15.129	60	60	58	50
5	14.6	60	52	45	40
10	14.2	60	50	43	37
15	13.784	60	53	44	35
20	13.4251	60	54	46	35
25	13.2	60	55	47	35
30	13	60	57	48	35
35	12.8	60	60	49	36
40	12.6	60	60	50	36
45	12.4	60	60	52	36
50	12.2	60	60	53	36
55	12	60	60	53	36
60	11.8	60	60	53	38
70	11.4	60	60	55	38
80	11	60	60	55	38
90	10.8	60	60	55	38
100	10.4	60	60	55	39
110	10.2	60	60	57	39
120	10.004	60	60	57	39
130	9.888	60	60	57	39
140	9.8	60	60	57	48

Tabla AQ 1 71 Trigo Oasis 15% humedad inicial temperatura 70°C

tiempo (min)	%humedad	t. entrada °C	t. lecho °C	t. bulbo. seco °C	t. bulbo. humedo °C
0	15.126	70	70	65	50
5	14.5	70	60	55	48
10	14	70	63	57	45
15	13.6	70	65	59	43
20	13	70	67	59	40
25	12.6	70	69	59	40
30	12	70	69	59	39
35	11.8	70	70	60	39
40	11.6	70	70	63	38
45	11.2	70	70	65	38
50	10.8	70	70	66	38
55	10.4	70	70	67	38
60	10.2	70	70	67	38
70	10	70	70	68	39
80	9.8	70	70	68	39

Tabla A 72 Trigo Oasis 15% humedad inicial temperatura 80°C

tiempo (min)	%humedad	t. entrada °C	t. lecho °C	t. bulbo. Seco °C	t. bulbo. humedo °C
0	15.129	80	80	70	40
5	14.2	80	70	65	37
10	13.8	80	72	68	37
15	13	80	75	72	38
20	12.6	80	78	72	38
25	11.8	80	79	73	38
30	11.23	80	80	74	39
35	10.6	80	80	75	39
40	10.3	80	80	75	39
45	10	80	80	75	39
50	9.8	80	80	78	39

Tabla A 73 Trigo Oasis 15% humedad inicial temperatura 100°C

tiempo (min)	%humedad	t. entrada °C	t. lecho °C	t. bulbo. seco °C	t. bulbo. humedo °C
0	15.129	100	100	85	35
10	13.7	100	85	75	35
15	13	100	90	80	36
20	12	100	95	85	36
25	11.2	100	98	90	37
30	10.6	100	100	95	38
35	9.8	100	100	97	38

Tabla A 74 trigo con humedad inicial 15% humedad secado a diferentes temperaturas y tiempos

T°C	Ecuación cuadrática	R
40	$Y=0.0009x^2 - 0.0437x + 15.021$	0.9992
60	$Y=0.0002x^2 - 0.0642x + 14.843$	0.9956
70	$Y=0.0006x^2 - 0.1182x + 15.129$	0.9969
80	$Y=0.001x^2 - 0.1582x + 15.141$	0.9951
100	$Y=0.0019x^2 - 0.2291x + 15.0$	0.9959

Tabla A 1 75 trigo Oasis 15% humedad inicial determinación de valores de k dx/dt en función de pérdida del % humedad

Temperatura °C		40	60	70	80	100
Tiempo (min)	%h	Dx/dt	Dx/dt	Dx/dt	Dx/dt	Dx/dt
0	15.129	0.0437	0.0642	0.1182	0.1582	0.2291
5	14.7	0.0432	0.0622	0.1122	0.1482	0.2101
10	14.5	0.0427	0.0602	0.1062	0.1382	0.1911
15	14.2	0.0422	0.0582	0.1002	0.1282	0.1721
20	13.85	0.0417	0.0562	0.0942	0.1182	0.1531
25	13.65	0.0412	0.0542	0.0882	0.1082	0.1341
30	13.25	0.0407	0.0522	0.0822	0.0982	0.1151
35	13	0.0402	0.0502	0.0762	0.0882	
40	12.65	0.0397	0.0482	0.0702	0.0782	
45	12.42	0.0392	0.0462	0.0642	0.0682	
50	12	0.0387	0.0442	0.0582	0.0582	
55	11.85	0.0382	0.0422	0.0522	3.6037	
60	11.55	0.0377	0.0402	0.0462	4.0287	
70	11.35	0.0367	0.0362	0.0342		
80	11.1	0.0357	0.0322	0.0222		
90	10.95	0.0347	0.0282			
100	10.75	0.0337	0.0242			
110	10.55	0.0327	0.0202			
120	10.5	0.0317	0.0162			
130	10.45	0.0307	0.0122			
140	10.4	0.0297	0.0082			
150	10.35	0.0287	2.2391			
160	10.3	0.0277	2.4191			
170	10.25	0.0267	2.5991			
180	10.25	0.0257	2.7791			
190	10.2	0.0247	2.9591			
200	10.15	0.0237	3.1391			
210	10	0.0227	3.3191			
220	9.95	0.0217	3.4991			
230	9.9	0.0207	3.6791			
240	9.85	0.0197	3.8591			

Ecuación dx/dt=Kx

Líneas de tendencia valores de k

Tabla A 1 76 trigo con 15% humedad inicial y secado a diferentes temperaturas y tiempos (valores de k)

T°C	Ecuación lineales	R
40	Y= 0.0042x-0.0149	0.8249
60	Y= 0.0097x- 0.074	0.8798
70	Y= 0.0154x - 0.1068	0.9256
80	Y= 0.0173x -0.0918	0.9264
100	Y= 0.0199x - 0.0627	0.9421

Ley de Arrhenius permite relacionar k con temperatura en grados kelvin por lo tanto

$$K = k_0 e^{-E/RT}$$

Tabla A 1 77 Valores de k

T °C	
40	0.0042
60	0.0097
70	0.0154
80	0.0173
100	0.0199

$$\ln k = \ln k_0 - \frac{E}{R} \left(\frac{1}{T} \right)$$

Tabla A 1 78 Valores de k en función de 1/T °K

°C	T°K ⁻¹	Lnk
100	0.00268	-3.91703
80	0.00286	-4.05705
70	0.00291	-4.17339
60	0.003	-4.63563
40	0.00319	-5.47267

Valores de E/RT (pendiente)

$$Y = -3173.5x - 4.8409 \quad R^2 = 0.8856$$

$$E = k(RT)$$

$$R = 8.314 \text{ kJ/kgmol}^\circ\text{K}$$

Curvas de secado de trigo Oasis 20% humedad inicial diferentes temperaturas (40, 60, 70, 80 y 100 °C) y tiempos hasta alcanzar humedad final de entre 8 y 11% Pérdida de humedad en función del tiempo

Tabla A 1 79 Trigo Oasis 20%humedad inicial temperatura de 40°C

tiempo (min)	% humedad	T. entrada °		T. bulbo. seco °C	T. bulbo. humedo °C
		C	T. lecho °		
0	20.4	40	40	37	35
5	20.2	40	38	36	34
10	19.8	40	37	35	33
15	19.4	40	37	35	33
20	18.8	40	38	35	33
25	18.65	40	39	36	33
30	18.4	40	39	36	33
35	18	40	39	36	33
40	17.7	40	39	36	33
45	17.4	40	39	36	33
50	17	40	39	36	33
55	16.8	40	39	36	33
60	16.6	40	39	36	33
70	16.2	40	39	36	33
80	15.8	40	39	36	33
90	15.4	40	39	36	33
100	15	40	39	36	33
110	14.6	40	39	36	33
120	14.2	40	39	36	33
130	14	40	39	36	33
140	13.6	40	39	36	33
150	13.4	40	39	36	33
160	13.2	40	39	36	33
170	12.8	40	39	36	33
180	12.5	40	39	36	33
190	12.4	40	39	36	33
200	12.3	40	39	36	33
210	12.2	40	39	36	33
220	12.1	40	39	36	33
230	12	40	39	36	33
240	11.9	40	39	36	33

Tabla A 1 80 Trigo Oasis 20%humedad inicial temperatura de 40°C

tiempo (min)	% humedad	T. entrada °			
		C	T. lecho °C	T. bulbo. seco °C	T. bulbo. humedo °C
0	20.4	60	60	52	45
5	18.8	60	55	48	40
10	18.2	60	50	45	37
15	17.5	60	51	46	36
20	16.9	60	53	48	35
25	16.4521	60	54	49	36
30	16	60	55	50	37
35	15.541	60	56	52	38
40	15.124	60	57	53	38
45	14.687	60	57	53	38
50	14.4512	60	59	53	38
55	14.124	60	59	53	38
60	13.7	60	59	54	38
70	13.4	60	60	54	38
80	13	60	60	55	38
90	12.789	60	60	55	38
100	12.45	60	60	55	38
110	12.24	60	60	55	38
120	12	60	60	55	38
130	11.6	60	60	55	38
140	11.4	60	60	55	38

Tabla A 1 81 Trigo Oasis 20%hi temperatura 70°C

tiempo (min)	% humedad	T. entrada °C			
		C	T. lecho °C	T. bulbo. seco °C	T. bulbo. humedo °C
0	20.4	70	70	65	48
5	18.5	70	62	55	44
10	17.6	70	57	50	42
15	16.7	70	60	52	40
20	15.8	70	62	57	39
25	15.2	70	65	62	39
30	14.68	70	68	65	38
35	14.2	70	69	66	38
40	13.7451	70	70	67	38
45	13.324	70	70	67	38
50	13	70	70	67	38
55	12.6	70	70	68	38
60	12.4	70	70	68	38
70	11.973	70	70	68	38
80	11.662	70	70	68	38
90	11.3	70	70	68	38

Tabla A 1 82 Trigo Oasis 20%hi temperatura 80°C

tiempo (min)	% humedad	T. entrada ° C	T. ° C		
			T. lecho °C	T. bulbo. seco °C	T. bulbo. humedo °C
0	20.4	80	80	77	36
5	17.9	80	70	63	33
10	16.7	80	65	60	33
15	15.6	80	69	63	34
20	15	80	70	65	35
25	14.2	80	73	67	36
30	13.5	80	75	69	37
35	12.8	80	77	70	37
40	12.5	80	79	73	37
45	11.6	80	80	75	37
50	11.3	80	80	76	37

Tabla A 1 83 Trigo Oasis 20%hi temperatura 100°C

tiempo (min)	% humedad	T. entrada ° C	T. ° C		
			T. lecho °C	T. bulbo. seco °C	T. bulbo. humedo °C
0	20.4	100	100	90	50
5	17.6	100	78	70	47
10	16.2	100	85	75	43
15	15.3	100	90	80	40
20	13.8	100	95	85	39
25	12.8	100	100	90	39
30	11.3	100	100	94	39

Tabla A 1 84 Líneas de tendencia ecuaciones cuadráticas derivadas de las curvas de secado del trigo con humedad inicial de 20% secado adifrentes temperaturas

T°C	Ecuaciones cuadráticas	R
40	$Y=0.0001x^2-0.0671x+20.273$	0.9981
60	$Y=0.0005x^2-0.1323x+20.351$	0.9956
70	$Y=0.001x^2-0.1936x+20.439$	0.9986
80	$Y=0.0018x^2-0.272x+20.431$	0.9974
100°C	$Y=0.0032x^2-0.3993x+20.438$	0.9981

Tabla A 1 85 Curvas de secado trigo Oasis 20% humedad inicial determinación de valores de k

Grafica de dx/dt en función de %h

Temperatur	.	40°C	60°C	70°C	80°C	100°C
tiempo	% humedad	Dx/dt	Dt/dt	Dx/dt	Dx/dt	Dx/dt
0	20.4	0.0671	0.1323	0.1936	0.2755	0.3993
5	19.564	0.0661	0.1273	0.1836	0.2575	0.3673
10	18.98	0.0651	0.1223	0.1736	0.2395	0.3353
15	18.54	0.0641	0.1173	0.1636	0.2215	0.3033
20	17.8	0.0631	0.1123	0.1536	0.2035	0.2713
25	17.547	0.0621	0.1073	0.1436	0.1855	0.2393
30	17.214	0.0611	0.1023	0.1336	0.1675	0.2073
35	16.784	0.0601	0.0973	0.1236	0.1495	
40	16.24	0.0591	0.0923	0.1136	0.1315	
45	15.987	0.0581	0.0873	0.1036	0.1135	
50	15.58	0.0571	0.0823	0.0936	0.0955	
55	15.2	0.0561	0.0773	0.0836		
60	14.857	0.0551	0.0723	0.0736		
70	14.5	0.0531	0.0623	0.0536		
80	14.2	0.0511	0.0523	0.0336		
90	14	0.0491	0.0423	0.0136		
100	13.8	0.0471	0.0323			
110	13.6	0.0451	0.0223			
120	13.4	0.0431	0.0123			
130	13.2	0.0411	0.0023			
140	13	0.0391	-0.0077			
150	12.9	0.0371				
160	12.8	0.0351				
170	12.7	0.0331				
180	12.6	0.0311				
190	12.5	0.0291				
200	12.4	0.0271				
210	12.3	0.021				
220	12	0.019				
230	11.6	0.017				
240	11.4	0.015				

Ecuación $-dx/dt=kx$

Tabla A 1 86 trigo con humedad de 20% humedad inicial y secado a diferentes temperaturas y tiempos (valores de k)

T°C	Ecuaciones lineales	R
40	Y=0.0057x-0.0404	0.9102
60	Y=0.0144x-0.145	0.9123
70	Y=0.0184x-0.156	0.8907
80	Y=0.0195x-0.1036	0.9587
100	Y=0.0215x-0.0249	0.9731

Ley de Arrhenius permite relacionar k temperatura en grados kelvin por lo tanto

$$K=k_0 e^{-E/RT}$$

Tabla A 1 87 Valores de k

T°C	k
40	0.0057
60	0.0144
70	0.0184
80	0.0195
100	0.0215

$$\ln k = \ln k_0 - \frac{E}{R} \left(\frac{1}{T} \right)$$

Tabla A 1 88 Valores ln k en función de 1/t °K humedad inicial del grano 20%

T°C	T°K ⁻¹	Lnk
100	0.00268	-3.8397
80	0.00286	-3.93734
70	0.00291	-3.9954
60	0.003	-4.24053
40	0.00319	-5.16729

$$Y = -2618x + 3.4293 \quad R^2 = 0.8207$$

$$E = k(RT)$$

$$R = 8.314 \text{ kJ/kgmol}^\circ\text{K}$$

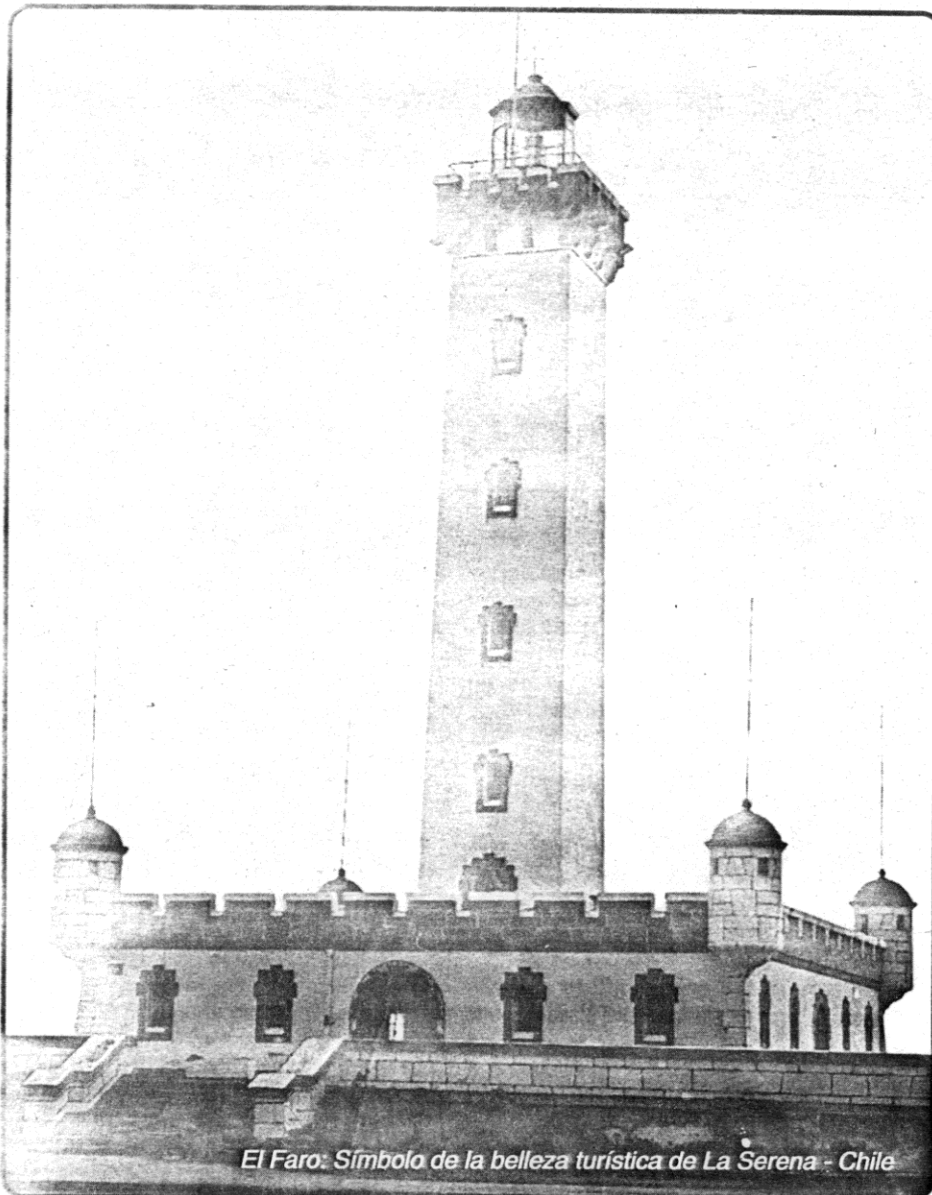
ISSN 0716-8756



INFORMACION TECNOLOGICA

REVISTA INTERNACIONAL

SEPARATA



El Faro: Símbolo de la belleza turística de La Serena - Chile

EFECTO DEL SECADO POR LECHO FLUIDIZADO SOBRE LA CALIDAD INDUSTRIAL DEL TRIGO (*Triticum aestivum*)

L. VAZQUEZ-CHAVEZ (1), M. VIZCARRA-MENDOZA (2), A.SALAZAR-ZAZUETA (3) e I. GUERRERO-LEGARRETA (1)

Univ. Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, (1) Depto. de Biotecnología, (2) Depto. de Ingeniería de Procesos, Av. Michoacán y La Purísima, Col. Vicentina Iztapalapa, 09340 México, D.F. - México
(3) INIFAP, Laboratorio de Tecnología de Cereales, Apartado Postal 10, 56230 Chapingo - México

RESUMEN

Se ha estudiado el efecto del secado mediante lecho fluidizado sobre la calidad de dos variedades comerciales mexicanas de trigos (*Triticum aestivum*), Salamanca y Oasis. Las variedades, se secaron en lecho fluidizado, usando cuatro niveles de temperatura (40, 60, 80 y 100°C) y tiempo de secado de una hora en todos los casos. Los trigos después de secados se molieron. Las harinas obtenidas se evaluaron con el farinógrafo y el mixógrafo para determinar el efecto térmico sobre sus características de mezclado en función del tiempo óptimo de amasado, estabilidad y tolerancia al mezclado. Finalmente, se realizó una prueba de panificación y se midió el volumen del pan. Los resultados se compararon con valores de trigo testigo que no fue sometido a proceso de secado. Las pruebas determinadas con el mixógrafo de Swanson. Se concluyó que el proceso de secado mediante lecho fluidizado depende directamente de la temperatura y de la variedad del trigo.

EFFECT OF FLUIDIZED BED DRYING ON THE INDUSTRIAL QUALITY OF WHEAT (*Triticum aestivum*)

ABSTRACT

Two commercial varieties of mexican wheat (*Triticum aestivum*), Salamanca and Oasis, were dried in a fluidized bed system at four temperatures (40, 60, 80, and 100°C) for one hour periods. The dried grains were then milled. The flour was evaluated with a farinograph and mixograph to determine the thermal effect on their mixing characteristics in relation to optimum development time, stability and mixing tolerance. Finally baking tests were carried out and loaf volumes were determined. Results were compared to controls without drying treatment. The tests were made with a Swanson mixograph. It was concluded that the effects of fluidized bed drying on the industrial quality of wheat depended directly on the temperature and wheat variety.

Keywords: wheat, drying, fluidized bed, breadmaking quality

INTRODUCCION

La humedad recomendada para cosechar el trigo en el campo es de entre 12 y 13% h (b.h.), no obstante si el proceso se lleva a cabo bajo condiciones de alta humedad se hace necesario el secado artificial de los granos con aire caliente (Lupano y Añon, 1987). Cuando el secado de trigo es aplicado sin un control debido de temperatura pueden provocarse cambios en su calidad. La mayoría de las veces estos cambios suceden sin alteración visual del grano, afectando básicamente las propiedades físicas de las masas con la consecuente reducción en su calidad industrial (Ghaly y Sutherland, 1984).

La sensibilidad del trigo a altas temperaturas de secado está asociada íntimamente con el proceso de desnaturalización de las proteínas del gluten y como es sabido, las características del gluten determina la calidad industrial del trigo (Lupano y Añon, 1987).

Para medir el efecto del tratamiento térmico sobre la calidad panadera del trigo, se han propuesto diversos métodos que evalúan las características físicas de las masas y del pan (Tosi et al., 1986; Booth et al., 1980). De estos, el farinógrafo y el mixógrafo han sido ampliamente usados para medir el efecto del tratamiento térmico sobre las propiedades de mezclado en función del tiempo óptimo de amasado, tiempo de desarrollo, tolerancia al mezclado y estabilidad (Finney et al., 1962). Preston et al., (1986) recomendaron el uso del mixógrafo para detectar el daño térmico sobre las propiedades reológicas del trigo Canadiense en su proceso de comercialización, ya que es un método rápido y de fácil ejecución.

La aplicación de la tecnología de lecho fluidizado en el secado de granos, permite un proceso más rápido y seguro que proporciona un buen control de temperatura con mezclado homogéneo adecuado, incrementando el contacto entre el grano y el aire de secado debido a la fluidización (Giner y Calvelo, 1987).

En este trabajo se investigó el efecto del secado por lecho fluidizado sobre las características de calidad de dos variedades de trigo, con diferente potencial de panificación.

MATERIALES Y METODOS

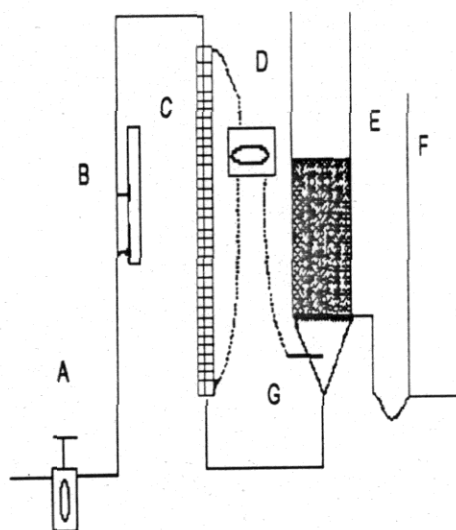
Materiales y condiciones experimentales de Secado

Dos variedades comerciales mexicanas de trigos (*Triticum aestivum*), clasificadas como Salamanca (trigo suave de gluten débil) y Oasis (trigo duro de

gluten fuerte), se limpiaron con aire y cribado manual. Los granos se humedecieron adicionando el agua necesaria y dejando en reposo 24 hr, hasta alcanzar una humedad de 22% h (b.s.).

El estudio de secado se realizó usando un equipo experimental de lecho fluidizado a escala de laboratorio, (figura 1). El secador esta formado en un tubo de acrílico de 0.1 m de diámetro por 0.6 m de longitud. En la parte inferior se encuentra un distribuidor de placa perforada y la parte superior está abierta a la atmósfera. La instalación cuenta con un control de temperatura regulado por un sistema automático digital (Chromalox; 3910-11208, rango de 0-500 °C tipo j). Se utilizó como medio fluidizante aire con contenido de humedad absoluta de 0.008 kg H₂O/kg aire seco. Inicialmente se fijó el gasto de aire a 1 atm de presión y un flujo de aire de 0.0119 m³/s y una velocidad superficial de 1.52 m/s. Se usaron termopares conectados a registradores de temperatura (Blue M., Electric Cop. Illinois E.U), para verificar que la temperatura de aire en la entrada y en el centro secador permaneciera constante.

Una vez establecido el sistema se cargó el secador con 1 kg de muestra de trigo húmedo 22% h (b.s.). Durante el proceso de secado se tomaron muestras por duplicado de entre 1 y 3 g en frascos a peso constante, a partir del tiempo cero y durante cada 10 min por espacio de una hora.



A: manómetro B: rotámetro C: resistencia eléctrica D: control de temperatura E: lecho fluidizado F: manómetro "U" G: termopar

Fig.1: Secador de lecho fluidizado experimental

El secador se mantuvo en condiciones constantes. La determinación de la pérdida de humedad de los granos se determinó por diferencia de pesos, secando a 110°C por 24 hr y la humedad de las muestras se calculó en base seca.

Se consideró que las variedades de trigos utilizadas en este estudio, presentaron una velocidad mínima de fluidización (U_{mf}) de 1.2 m/s y una fracción de vacío del lecho (ϵ) de 0.4 (adimensional). En promedio las características físicas de los granos fueron; diámetro de partícula (d_p) 0.004 m, factor de forma de la partícula (ϕ) 0.83 (adimensional) y densidad aparente del sólido (δ_p) 1350 kg/m³. Hidrodinámicamente el trigo se comportó como un sólido tipo D, en la clasificación Geldart, el cual se caracteriza por una fluidización explosiva (Kunii y Levenspiel, 1991).

Análisis de calidad

Tanto el trigo testigo (que no fue sometido a proceso de secado) como los trigos secados a las diferentes temperaturas (40, 60, 80 y 100°C) se molieron en un molino de laboratorio Brabender Quadrumat Senior. A los granos y a las harinas obtenidas se les determinó porcentaje de humedad (método 44-15 AACC, 1983) y porcentaje de proteína (Nx5.7) (método 46-11a AACC, 1983).

Para medir las características físicas de las masas se usó el farinógrafo de Brabender (C.W. Brabender instruments, South Hackensack, NJ.) y se determinó estabilidad, tiempo óptimo de mezclado y tolerancia al mezclado de la masa (método 54-21 AACC, 1983).

Se empleó el mixógrafo (National manufacturing Co., Lincoln, NB.) para medir las características de las masas. Se colocaron en la mezcladora 10g de harina y agua durante un tiempo de mezclado de 6 min (método 54-40 AACC, 1983). Por medio de la curva mixográfica se determinó el desplazamiento del pico (tiempo óptimo) hacia la derecha y el alargamiento de la curva de acuerdo la forma mixográfica del trigo control (sin tratamiento térmico).

Posteriormente con las harinas se elaboró pan por el método directo de panificación (método 10-10 AACC, 1983) y se determinó el volumen del pan por desplazamiento de semillas de nabo.

RESULTADOS Y DISCUSION

Secado lecho fluidizado

Las figuras 2 y 3 muestran, que la velocidad de secado, de ambas variedades de trigo, aumento proporcionalmente al incremento de temperatura

con una pérdida de humedad más intensa y rápida durante los tratamientos a 80 y 100°C. En general las curvas muestran periodos de secado de mayor intensidad en la zona de velocidad decreciente, donde la mayor influencia sobre la difusión del agua del interior del medio de secado. Como lo ha indicado Bakker-Arkema et al. (1975) en este período la velocidad la transferencia de masa depende esencialmente de la temperatura de aire y de la textura del grano, sin afectar la velocidad del aire de secado. Además la cantidad de agua evaporada en la superficie va siendo paulatinamente menor, pero el aporte calórico es constante y la temperatura alcanzada es la correspondiente al bulbo seco del aire dentro del deshidratador.

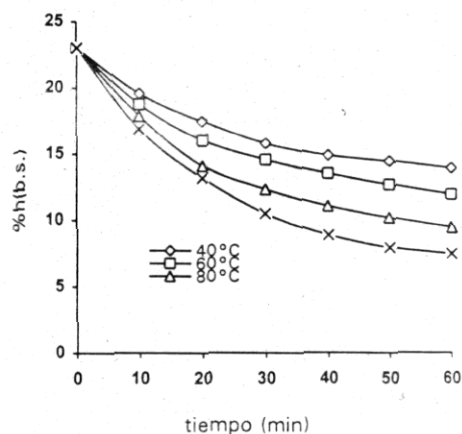


Fig. 2: Secado del trigo por lecho fluidizado variedad Oasis

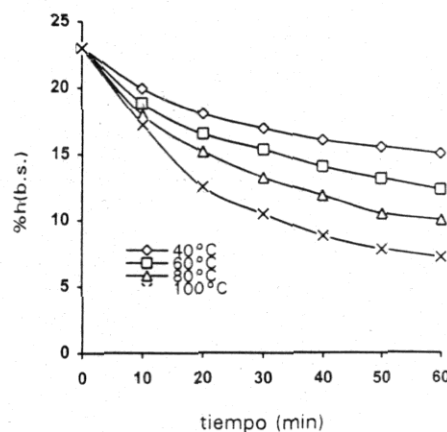


Fig. 3: Secado del trigo por lecho fluidizado variedad Salamanca

Esta es la razón de por que la mayor parte del deterioro ocasionado a los granos, durante el secado, se produce en el período de velocidad decreciente, por ello durante este período debe haber un buen control de temperatura (Ghaly y Taylor, 1982; Geankoplis, 1995).

Por otro lado las diferentes temperaturas usadas en este estudio no afectaron el contenido de proteína de las variedades de trigo tratadas. El contenido de proteína del grano de la variedad Oasis fue del 10.8 y el de la variedad Salamanca del 9.5.

Pruebas reológicas

La figura 4 muestra las curvas farinográficas para las dos variedades de trigo en orden ascendente de temperatura. Las altas temperaturas de secado, influyeron directamente sobre las características farinográficas de las masas del trigo en relación al tiempo óptimo de mezclado, estabilidad y tolerancia al mezclado, debido posiblemente a la desnaturalización del gluten, concordando con lo reportado por Preston et al. (1989). Estos parámetros resultaron ligeramente mayores para la variedad Oasis con gluten fuerte, con mejores características viscoelásticas y de panificación, que para la variedad Salamanca con gluten débil.

La figura 5 muestra las curvas mixográficas para ambas variedades de trigo. El pico máximo que muestra el tiempo de mezclado en el mixógrama, presentó diferencias de hasta un minuto y medio en comparación con los valores obtenidos para las masas de trigos testigo. Con valores ligeramente mayores para la variedad Oasis con gluten fuerte (más resistente al mezclado) que para la variedad Salamanca con gluten débil (menos resistente al mezclado). Los trigos sometidos a temperatura de 100°C proporcionaron mixogramas atípicos con alturas mixográficas muy bajas y curvas más largas, con achatamiento o falta de un pico máximo definido, indicativo de una pobre consistencia de la masa.

Los cambios registrados en las propiedades del mezclado en este trabajo coinciden con lo reportado por Preston et al. (1989) quienes concluyeron que el mixógrafo es un instrumento sensible para identificar daño térmico en trigo.

Prueba de panificación

La figura 6 muestra una progresiva reducción de los volúmenes de las hogazas de pan directamente relacionados con la temperatura de secado a la cual fue sometido el trigo.

En general la variedad de trigo suave Salamanca resultó ser más sensible a las altas temperatura de

secado, mostrando volúmenes de la hogaza de pan menores, en comparación con los obtenidos para la variedad fuerte Oasis.

Un secado correcto a temperatura de 40 y 60 °C mostró tener un efecto mejorador sobre la calidad del grano para ambas variedades, obteniéndose panes de buen aspecto exterior y volúmenes iguales o ligeramente superiores al volumen del pan elaborado con harina de trigo testigo.

En contraste los panes obtenidos con los trigos tratados a 80 y 100°C resultaron con menores volúmenes, con superficie externa agrietada y características de textura y miga deficiente en comparación con las características del pan testigo

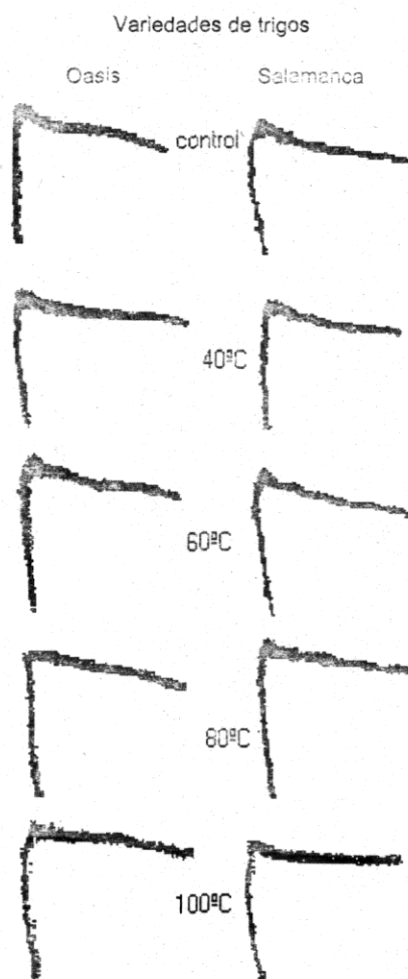


Fig. 4 Efecto de las temperaturas de secado sobre las características farinográficas

Variedades de trigo

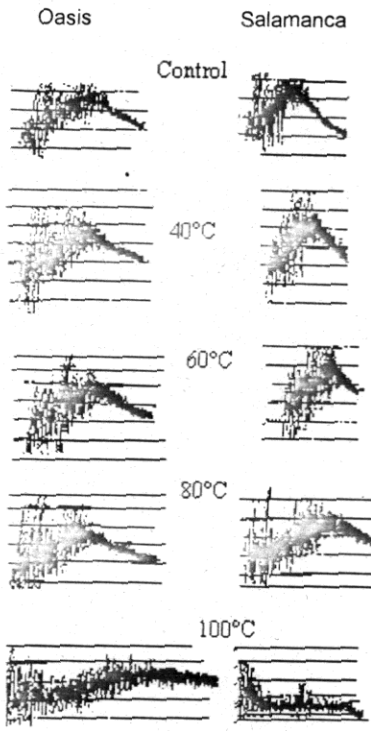


Fig. 5: Efecto de las temperaturas de secado sobre las características mixográficas

Ghaly y Shuderland, (1984) encontraron la misma tendencia en trigos Australiano

CONCLUSIONES

En el secado del trigo, el principal efecto significativo dependió de la temperatura, siendo muy importante su control en la fase decreciente ya que normalmente esta etapa de secado es la de mayor duración.

Las características mixográficas y farinográficas fueron notoriamente influenciadas por las temperaturas de secado.

El mixógrafo registró cambios de consistencia de las masas en relación a la temperatura de secado, cuyo análisis es de fácil ejecución y por lo tanto puede ser utilizado en control de calidad para predecir el daño térmico causado al trigo.

De igual forma los volúmenes de las hogazas de pan fueron disminuyeron directamente con el aumento de temperatura de secado al cual fue sometido el trigo.

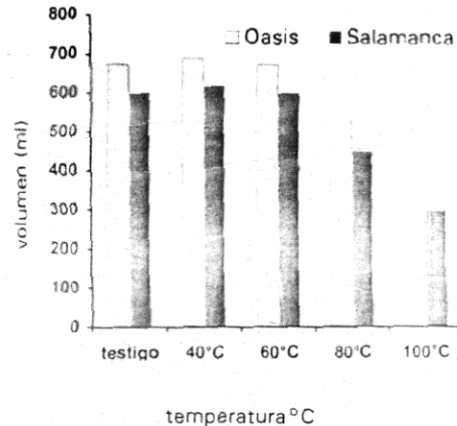


Fig. 6: Prueba de panificación, volumen de pan

REFERENCIAS

American Association of Cereal Chemists. Approved Methods of AACC, The Association. St Paul, M. N. E U A. (1983)

Bakker-Arkema, F., Brooker, D., Hall, C. Drying Cereal Grain, The AVI. Publishing Company. Connecticut, E U A. (1975)

Booth, M. R., Bottomley, R. C., Ellis, J. R. S, Malloch, G., Schofield, J. D. y Timms, M. F., The Effect of Heat on Gluten-Physico-Chemical Properties and Baking Quality, Ann. Technol. Agric: 29 (2), 399-408 (1980).

Finney, K. F., Shogren, M. D., Hosney, R. C., Bolte, L. C. y Heyne, E. G. Chemical, Physical, and Baking Properties of Preripe Wheat Dried at Varying Temperatures, Agronomy J:54, 244-247 (1962)

Geankoplis, J. Ch., Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias, 2ª edición. CECSA., México D.F (1995)

Ghaly, T. F. y Sutherland, J. W. Heat Damage to Grain and Seeds, J. Agric. Eng. Res:30, 337 (1984)

Ghaly, T. F. y Taylor, P. A. Quality Effects of Heat Treatment of Two Wheat Varieties, J. Agric. Eng. Res:27, 227 (1982)

Giner, S. A. y Calvelo, A. Modelling of Wheat Drying in Fluidized Beds, J. of Food Science: 52(5), 1358-1363 (1987)

Kunii y Levenspiel O. Fluidization Engineering.

International Journal of
FOOD PROPERTIES

food properties
for success
data
measurements
predictions
applications



Compliments of
MARCEL DEKKER, INC.

Please find a complimentary copy of the issue where your article has appeared.

We encourage you to recommend this publication to your library. Complete subscription information is on the inside front cover.

Thank you.

All Dekker journals are online

Research + Dekker.com → results

VOLUME 4

NUMBER 3

2001

Includes Indexes to Volume 4



EFFECT OF HEAT TREATMENT ON THE INDUSTRIAL QUALITY OF TWO VARIETIES OF MEXICAN WHEAT

L. Vázquez,^{1,*} M. Vizcarra,² A. Salazar,⁴ A. Castillo,³
and I. Guerrero¹

¹Department of Biotechnology, ²Department of Process Engineering, and ³Department of Mathematics, Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, Ap. Postal 55-535, C.P. 09340 Mexico D.F., Mexico

⁴Cereal Technology Laboratory, INIFAP, Chapingo, Mexico

ABSTRACT

Two Mexican wheat varieties conditioned to three initial moisture levels (17, 25 and 37% dry basis) were dried with air at 40, 60, 80 and 100°C for 60 min periods in a laboratory scale fluidised bed system. Drying kinetics and activation energy was determined. Weight per hectolitre, wheat hardness, total protein content, dough mixing time and loaf volume were analysed. The results showed that the initial moisture content and drying velocity lowered the activation energy necessary to extract water from the grain. The effect of temperature and moisture content in the grain were the most important factors to control damage during drying. The hard wheat variety was less susceptible to heat damage than the soft variety, probably due to its higher protein content and harder texture. Weight per hectolitre, wheat hardness and drying did not considerably modify total protein content. Conversely, mixing time and loaf volume showed changes directly related to heat treatment severity. Fluidised bed drying at 40 and 60°C

*Corresponding author. E-mail: lvch@xanum.uam.mx

of both varieties at 17% initial moisture content showed an improving effect on loaf volume.

INTRODUCTION

Harvested wheat in Mexico has, in general, no more than 14% moisture content (wet basis). However due to ambient humidities, in some regions it may have up to 37% moisture content (wet basis) [1]. From the commercial point of view, this high moisture content results in rejection due to fast deterioration of wheat [2]. For this reason, grain with high moisture content is subjected to a drying process [3]. However, wheat drying at high rate and temperature can be deleterious without visual alteration of the material. Further processing, such as breadmaking make this alteration evident [4, 5, 6]. Uncontrolled temperature conditions during drying mainly affect gluten proteins, decreasing the breadmaking potential and resulting in reduced loaf volume and undesirable sensory characteristics [7, 8]. Schofield et al. [9] and Lupano and Anon [10] demonstrated that changes in glutenin are mainly due to application of high temperatures during drying. However, other factors such as variety, initial moisture content of the grain and drying time must be also considered. Ghaly and Sutherland [11] and Giner and Calvelo [12] studied fluidised bed drying as an alternative method. As this process has high mass and energy transport coefficients, better thermal yield takes place at higher velocity resulting in minimal quality deterioration of dried wheat and production of an homogeneous material [7, 13, 14]. The objective of this work was to study the effect of initial moisture content of the grain and drying temperature on the breadmaking quality of two commercial wheat varieties grown in Mexico, dried in a fluidised bed system. As moisture content in Mexican wheat may vary considerable due to weather conditions throughout the country, the effect of initial moisture content is a determinant factor; standardization of this parameter contributes to better marketing. In addition, no comparative studies have been reported including hard and a soft Mexican varieties, resulting in different grain characteristics and, in consequence different breadmaking quality of wheat.

MATERIALS AND METHODS

Raw Material

Two commercial wheat varieties (*Triticum aestivum*), commonly cropped in Mexico, a soft variety, Salamanca S75 from Bajío, Guanajuato (Central Mexico) and a hard variety, Oasis F89, Valle del Fuerte, Sinaloa (Pacific

coast), harvested in 1998 were kindly supplied by INIFAP (National Research Institute for Forestry, Agriculture and Animal Production, Mexico). Samples were sieved to eliminate debris. They were then thoroughly mixed, separated into 1000 g batches and randomly allocated to each one of three initial moisture content (17, 25 and 37% dry basis). In order to reach these moisture contents, the samples were added with enough water and left for 24 h at room temperature (ca. 18°C) to stabilise.

Wheat Drying

It was carried out using a laboratory scale fluidised bed system consisting of an acrylic cylinder 0.1 m diameter, 0.6 m high with an open upper part and a perforated plate distributor located in the bottom. The vacuum equipment was calibrated with dry air (0.008 kg water/kg air), 0.01214 m³/s volumetric flow and 1.54 m³/s surface velocity. Experimental temperatures were 40, 60, 80 and 100°C. Inlet air temperature was kept at a constant rate by means of a controller; bed temperature was continuously monitored with thermocouples connected to a recorder (Blue M., Electric Corp., IL). Once the system was thermally equilibrated, 1 kg wet grain was fed to the drier. Three-gram samples were taken in triplicate every 10-min up to 1 h of total study time.

Moisture content was calculated as dry basis by weight difference after drying grain samples at 110°C for 24 h [13, 15]. Using the Arrhenius equation activation energy necessary for drying each wheat variety was obtained. Minimum fluidising velocity (U_{mf}) was 1.2 m/s with a vacuum bed fraction of 0.4. Both wheat varieties had 0.004 m average particle diameter (d_p), 0.83 factor particle shape (ϕ) and 1350 kg/m³ solid apparent density (ϕ_p) [15]. After drying, the grain was rapidly cooled down to ambient temperature and stored in a dry place at ca. 18°C.

Grain Quality

Quality parameters analyzed after drying were: weight per hectolitre (WH) by the AACC method number 55-10 [16] in a Cobos cereal balance, model BOE6-5-59; wheat hardness using the Scott barley pearler standard method, measuring the material eliminated after abrasion of a 20 g sample during 1 min and total protein content by AACC method number 46-10 [16] using a 5.7 factor. Wheat milling was carried out in a laboratory scale mill (Quadrumat Senior Mill, Brabender Inc. South Hackensack, NJ) following the AACC method number 26-20 [16]. Mixing characteristics were analysed according to the AACC method number 54-40 [16] using a

Swanson mixograph (National Manufacturing Co. LN). Maximum displacement (optimum time) was obtained from the graphs; graph deformation in the mixograph plots was also recorded. Finally bread was fabricated with tested wheat according to the direct breadmaking method number 10-10 [16]. Loaf volume was determined by seed displacement [16]. Untreated wheat was used as control.

Statistical Analysis

Treatments were randomly allocated to a factorial model including two levels of wheat variety (Oasis and Salamanca), four temperatures (40, 60, 80 and 100°C) and three initial moisture contents (17, 25 and 37%). All treatments were studied in duplicate. Response variables were weight per hectolitre, wheat hardness and total protein content, dough mixing time in a Swanson mixograph, and loaf volume. Analyses were made in triplicate. Data were subjected to analysis of variance and multiple range test (Tukey's test) [17], using a SAS statistical package [18].

RESULTS AND DISCUSSION

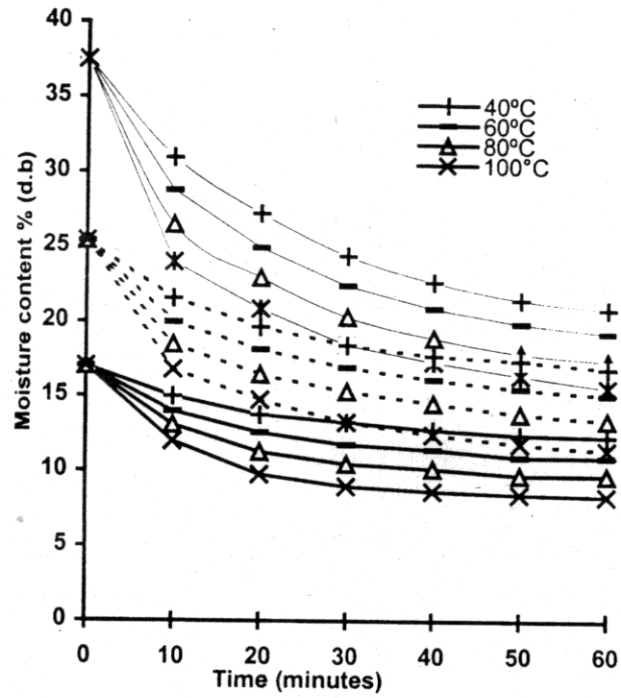
According to the drying curves (Figure 1) an increase in temperature accelerated grain dehydration. According to Tosi et al. [19] and Fellow [20] this process starts with a diffusion mechanism at increasing temperature. Both wheat varieties had similar behaviour; however the soft variety (Salamanca) had a final moisture content 1% lower compared to the hard variety (Oasis). Drying velocity ($-dx/dt$) had a linear relationship with drying time (Eq. (1)), with a further decreasing trend.

$$-dx/dt = k(x) \quad (1)$$

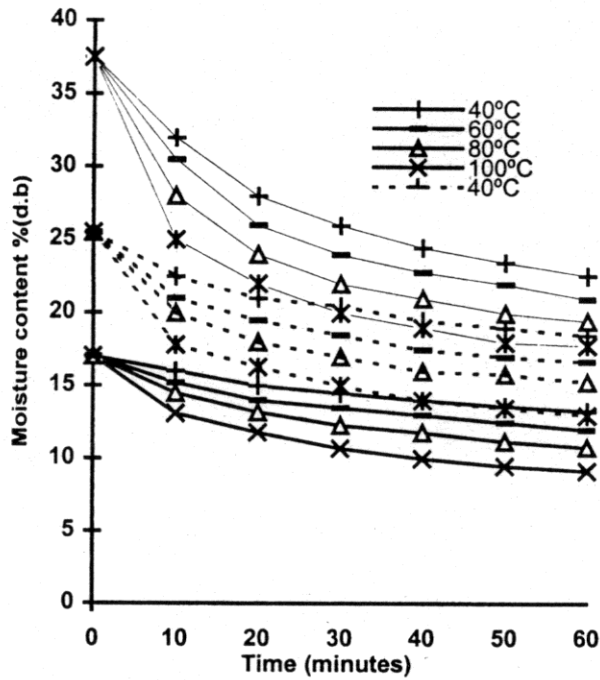
Table 1 shows k values, calculated for each variety, initial moisture content and drying temperature. Assuming that k followed the Arrhenius law, once Eq. (2) was linearised the activation energy was related to thermal process as:

$$k = k_0 e^{-E/RT} \quad (2)$$

where k is drying constant (s^{-1}), k_0 is pre-exponential factor (s^{-1}), E is activation energy (kJ/kg mol), R is gas constant (8.314 kJ/kg mol °K), and T is temperature (K). From the activation energy values, it was concluded that the drying temperature affected the water diffusion velocity from the interior to the grain surface. The higher the drying velocity the lower the activation



Salamanca



Oasis

Figure 1. Drying curves for Salamanca and Oasis varieties at 17, 25, and 37% initial moisture content.

Table 1. Drying Velocity Constant (k) and Activation Energy (E) for Two Mexican Wheat Varieties

Initial Moisture Content (%)	Variety: Salamanca			Variety: Oasis			
	17	25	37	17	25	37	
T (°C)	40	2.11 ^a	4.21	8.09	1.41	2.67	5.17
	60	2.31	4.49	8.91	2.22	3.10	5.44
	80	3.29	5.85	10.83	2.81	4.42	7.38
	100	4.18	7.69	12.41	3.44	5.75	8.48
E ^b		11,315	9,993	7,175	14,325	12,903	8,713

^a k : kg water/kg dry solids.

^b kJ/kg mol.

energy. Therefore, as the initial moisture content of the grain increased, activation energy necessary to extract the water decreased (Table 1). Initial moisture content was gradually eliminated at different velocities depending on the wheat variety and drying temperature.

Ghaly and Sutherland [11] and Fellow [20] reported that physical and chemical properties of wheat grains and wheat flours can be affected by heat treatment, damaging cell membranes and increasing solute concentrations, resulting in an increase in osmotic pressure. When drying temperature is increased due to high drying velocity, changes in the grain occur. These changes are more deleterious than changes caused by low dehydration velocity and temperature. Therefore, parameter control is of main importance in keeping a high grain quality [21].

Grain Quality Characteristics

Weight per hectolitre (WH) and grain hardness showed significant differences ($P > 0.05$) for varieties and temperature, but not for initial moisture content and their interactions. WH had a disperse behaviour with minor adjustment of the obtained results. Halverson and Zeleny [22] and Hosney [23] showed that WH and grain hardness are quality parameters characteristic of each variety and related to milling quality. The specific use of each variety depends on density, moisture, impurities and grain uniformity. The more dense the grains, the more probable to stand heat treatment during drying. Table 2 shows that WH mean values for Oasis were higher than for Salamanca. Conversely, hardness was lower for Oasis than for Salamanca, as a result of a softer texture. Fellow [20] reported that grain structure, different among varieties, is modified during heat treatment resulting in more or less rough aspect due to expansion and contraction. This changes in roughness is due to grain density, and consequently to its WH and

Table 2. Mean Values for Quality Parameters of Wheat Grain and Flour

Response Variable	Moisture Content (%)														
	17					25					35				
	WH	Hard	Prot	MT	LV	WH	Hard	Prot	MT	LV	WH	Hard	Prot	MT	LV
	Oasis														
Control	81.4	38.2	11.3	3.6	677	80.9	38.4	11.0	3.3	610	80.9	38.3	11.2	3.62	600
40°C	79.5	47.5	11.0	3.8	710	79.3	45.0	11.2	3.3	690	79.8	41.8	11.2	3.33	650
60°C	78.1	47.0	11.2	4.1	650	78.4	48.8	10.9	4.7	620	78.1	44.8	11.3	4.45	580
80°C	78.2	46.0	11.4	4.5	550	77.7	47.0	11.2	4.5	530	78.6	42.3	11.2	4.65	560
100°C	78.5	41.0	11.4	5.0	392	77.6	42.3	11.3	5.0	370	73.4	41.0	11.2	4.75	360
	Salamanca														
Control	78.8	57.5	9.6	2.4	602	78.8	59.5	9.4	2.4	602	78.8	59.5	9.9	2.4	602
40°C	77.7	60.0	9.7	2.2	655	73.8	59.1	9.2	2.5	620	73.3	66.1	9.8	3.0	605
60°C	77.0	61.5	9.8	3.0	635	75.4	59.8	9.6	2.4	635	70.4	64.5	9.8	3.7	675
80°C	77.2	59.2	9.5	4.0	620	74.8	59.6	9.7	4.4	567	69.3	58.8	9.6	4.0	352
100°C	63.2	53.7	9.5	4.0	312	73.7	53.4	9.8	4.1	350	69.2	54.4	9.5	4.5	297

WH: weight per hectolitre (kg/hL); Hard: Hardness (%); Prot: protein content (%); MT: mixing time (min); LV: loaf volume (cm³).

hardness. In spite of changes in the physical characteristics of heat-treated grain, results did not show changes as a direct result of variation in drying temperature. Therefore, these parameters cannot be considered as quality index, in agreement with the finding of Tosi et al. [19] and Campaña et al. [24]. Total protein content showed significant differences ($P > 0.05$) only with respect to wheat variety. It was assumed that no protein losses occurred during drying.

Analysis of variance showed that dough mixing time had significant differences for varieties and temperatures, but not for initial moisture content (Table 3). Table 2 shows that Oasis wheat, with strong, more resistant gluten, had a higher mixing time than Salamanca wheat, with a weak, less resistant gluten. Pomeranz [2] reported that gluten proteins form a network, and this structure depends on among and characteristics of the residues. The network strength determines the physicochemical characteristics of given dough, as well as its breadmaking characteristics. When grains were dried at 40 and 60°C, the dough had mixing times close to that found for the control. This means that at these temperatures the dough did not had detrimental rheological changes due to heat treatment. Conversely, the dough obtained from grain dried at 80 and 100°C had a considerable decrease in their rheological properties, showing mixing times much higher than the control. These results were similar to those reported by Finney et al. [4] and Preston et al. [5] for Canadian wheat varieties. These authors found that wheat gluten subjected

Table 3. Tukey's Test for Quality Parameters of Wheat Grain and Flour (Mean Values)

Source of Variation		Weight per Hectolitre (kg/hL)	Grain Hardness (g/20 g)	Total Protein Content (%)	Mixing Time (min)	Loaf Volume (cm ³)
Variety	Oasis	76.43 ^a	43.27 ^b	11.28 ^a	4.23 ^a	584.65 ^a
	Salamaca	74.09 ^b	59.13 ^a	9.14 ^b	3.20 ^b	544.33 ^b
Temperature °C	Control	79.87 ^a	48.56 ^c	10.397 ^a	3.03 ^d	620.04 ^c
	40	72.29 ^b	53.23 ^{a,b}	10.337 ^a	3.30 ^c	652.91 ^b
	60	74.91 ^b	54.39 ^a	10.433 ^a	3.26 ^c	640.01 ^a
	80	74.61 ^b	52.19 ^b	10.429 ^a	4.34 ^b	530.83 ^d
	100	71.74 ^b	47.64 ^c	10.440 ^a	4.56 ^a	348.25 ^e
Initial moisture content %	17	76.43 ^a	51.26 ^a	10.25 ^a	3.73 ^a	570.50 ^a
	25	75.74 ^a	51.27 ^a	10.32 ^a	3.64 ^a	562.2 ^{a,b}
	37	73.68 ^a	10.45 ^a	9.68 ^a	3.78 ^a	560.25 ^b

^{a,b} means in one column within the same source of variation with the same letter are not significantly different.

to a drastic drying process became harder and tougher, increasing dough mixing time. The maximum mixing time peak in mixograph plots was shifted forward in more than 1 min, changing the line shape, and decreasing the peak high as drying temperature increased. Samples undergoing damage during drying were identified for the graph elongation after dough hydration (Figure 2). In addition, these plots lack a characteristic peak after 6 min mixing. Several authors [25, 26, 27, 28] reported that modifications in wheat dough physical properties, previously subjected to heat treatment, were due to denaturation of albumin, globulin and gliadin. These proteins can interact among themselves or with glutenin fractions, the main protein affected by thermal treatment. As a result aggregates are formed through hydrophobic and disulphur bonds, leading to folding of gluten proteins. Therefore, when proteins modify new high molecular weight protein complexes are formed, affecting the dough rheology.

Statistical analysis showed significant changes in loaf volume for varieties, temperature and initial moisture content (Table 3). Our results are in agreement with those reported by Bruce [29] who reported that loaf volume, widely used to determine flour quality, was a very sensitive test. Loaf volume mean values (Table 2) of bread prepared with grain dried at 40 and 60°C was slightly higher than the control, revealing that these two temperatures prevented quality deterioration, in addition to promote an improvement in loaf volume.

According to Kent [30] it is possible to promote an increase in loaf volume with respect to the control by proteolytic enzyme inactivation which occurs between 55 and 60°C. Conversely, loaf volume when wheat treated at 80 and 100°C were lower, with cracked surfaces and deficient internal aspect.

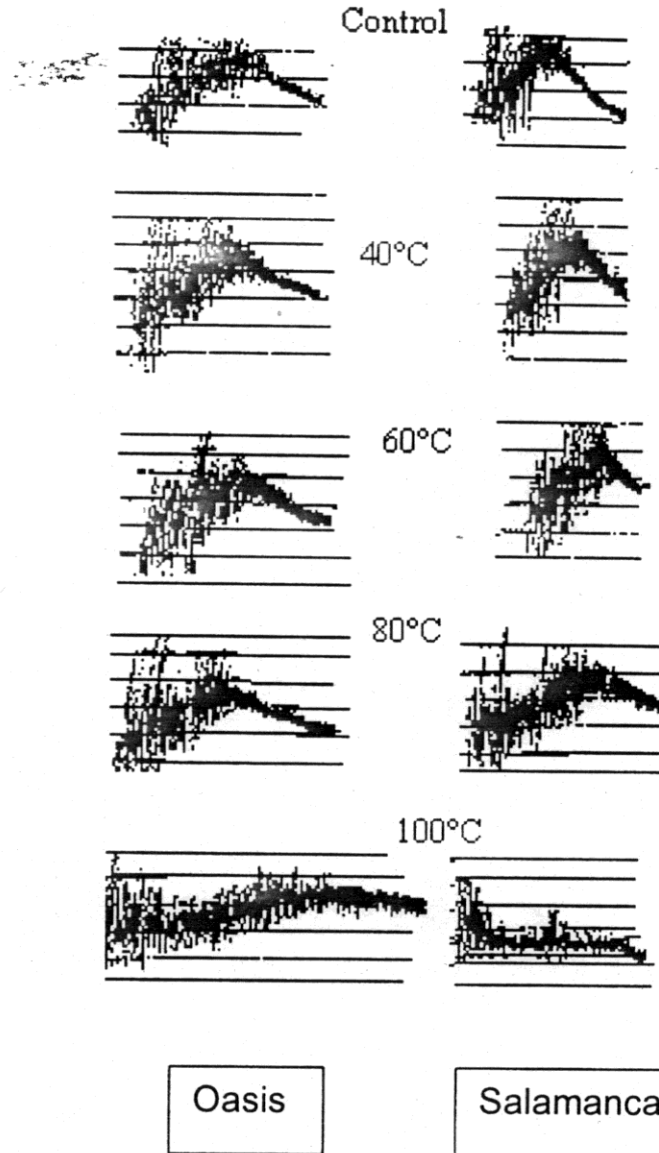


Figure 2. Mixograms for Salamanca and Oasis wheat varieties.

These flours had low or no fermentation capacity. High temperatures promoted protein denaturation and aggregation, with no water binding ability; starch gelatinises, cellulose crystallises and tissues harden [26, 9, 19]. All these phenomena affect flour breadmaking quality.

Loaf volume is mainly affected by dried temperature (Tables 2 and 3). Tosi et al. [19], Lupano and Añon [10] and Campaña et al. [24] reported that initial moisture content of the grain and drying temperatures must be low in order not to affect wheat breadmaking quality. In this work, Tukey's test showed that means for initial moisture content were different only at 17% (Table 3). In general, soft-gluten Salamanca variety having less protein content was more affected by heat treatment than hard-gluten Oasis variety

with more protein content (Tables 2 and 3). This was in agreement with that reported by Ghaly and Taylor [31] for Australian wheats, showing that grain hardness and protein content were the main factors affecting wheat drying.

CONCLUSIONS

The main effect on wheat quality during fluidized bed drying was drying temperature and, in a lesser extent, wheat variety and initial moisture content of the grain. Grain hardness was more affected by thermal treatment than weight per hectolitre. Physical properties such as weight per hectolitre and hardness were not sensitive enough to detect heat damage in the grain. Conversely, the detrimental effect notably affected dough mixing characteristics and loaf volume. Dough mixing time, as measured in a mixograph, showed changes in viscoelastic properties of wheat dough in a direct relationship to gluten denaturation, estimated by changes in loaf volume. Wheat quality deterioration due to excessive heating (80 to 100°C) promoted a reduction in wheat breadmaking characteristics, with deficient or no leavening. Adequate drying at 40 to 60°C of grain with 17% initial moisture content seemed to have an improving effect on grain quality. A soft wheat variety, Salamanca, with 9% protein content was more affected by heat treatment than a hard wheat variety, Oasis, with 11% protein content.

REFERENCES

1. Contreras, R.M.; Zárate, V.J.; Santoya, C.H.; Pérez, B.R. Principales Regiones Productoras de Trigo. In *Perspectivas de la producción de trigo en la región sur de Sonora frente al Tratado de Libre Comercio*; Universidad Autónoma de Chapingo, Centro de Investigaciones Económicas: Mexico, 1993; 24.
2. Pomeranz, Y. Biochemical, Functional and Nutritive Changes During Storage. In *Storage of Cereal Grains and their Products*, 4th Ed.; Saner, B.D. Ed.; The American Association of Cereal Chemists: St. Paul MN, 1992; 55.
3. Dexter, E.J.; Matsuo, R.R.; Daniel, W.R. The Influence of Heat Damage on Durum Wheat Spaghetti Quality. *Can. J. Food Sci. Tech.* **1989**, *22* (3), 229–237.
4. Finney, K.F.; Shogren, M.D.; Hosney, R.C.; Bolte, L.C.; Hoyne, E.G. Chemical, Physical and Baking Properties of Preripe Wheat Dried at Varying Temperatures. *Agr. J.* **1962**, *54*, 244–247.
5. Preston, R.K.; Morgan, C.B.; Kilborn, H.R.; Tipples, H.K. Assessment of Heat Damage in Canadian Hard Red Spring Wheats. *Can. J. Food Sci. Tech.* **1989**, *22* (1), 63–69.

6. Giner, A.S.; Calvelo, A. Modelling of Wheat Drying in Fluidized Beds. *J. Food Sci.* **1987**, *52* (5), 1358–1363.
7. Booth, M.R.; Bottomley, R.C.; Ellis, J.R.S.; Malloch, G.; Schofield, J.D.; Timms, M.F. The Effect of Heat on Gluten-Physicochemical Properties and Baking Quality. *Ann. Tech. Agric.* **1980**, *29* (2), 399–408.
8. Kirleis, W.A.; Housley, L.T.; Emam, M.A.; Patterson, L.F.; Okos, R.M. Effect of Preripe Harvest and Artificial Drying on the Milling and Baking Quality of Soft Red Winter Wheat. *Crop Sci.* **1982**, *22*, 871–876.
9. Schofield, D.J.; Bottomley, C.R.; Timms, F.M.; Booth, R.M. The Effect of Heat on Wheat Gluten and the Involvement of Sulphydryl-disulphide Interchange Reactions. *J. Cereal Sci.* **1983**, *1*, 241–253.
10. Lupano, E.C.; Añón, C.M. Denaturation of Wheat Endosperm Proteins During Drying *Cereal Chem.* **1987**, *64* (6), 437–442.
11. Ghaly, T.F.; Taylor, P.A. Quality Effects of Heat Treatment of Two Wheat Varieties. *J. Agric. Eng. Res.* **1982**, *19*, 95–106.
12. Giner, A.S.; Lupano, C.E.; Añón, M.C. A Model for Estimating Loss of Wheat Seed Viability During Hot-air Drying. *Cereal Chem.* **1991**, *68* (1), 77–80.
13. Tosi, E.; Re, B.; Catalano O.; Cazzoli, A. Secado de Trigo por Lecho Fluidizado. Influencia de las Variables del Proceso de Secado en la Calidad Panadera de las Harinas. *Alim. Latinoam.* **1982**, *133*, 61–88.
14. Every, D. A Simple, Four-minute Protein Solubility Test for Heat Damage Wheat, *J. Cereal Sci.* **1987**, *6*, 225–236.
15. Vizcarra, M.M.; Recio, E.A.; Vázquez, Ch.L.; Ruiz M.R. Efecto del Contenido de Humedad y Temperatura en la Determinación de la Difusividad del Agua Durante el Secado de Trigo en Lecho Fluidizado. *Tec. Ciencia Educ.* **1998**, *13* (1–2), 11–19.
16. American Association of Cereal Chemists. Approved methods of AACC. St. Paul, MN, **1983**.
17. Montgomery D.C. Diseño de Experimentos, Análisis de Varianza. In *Diseño y Análisis de Experimentos*; Montgomery D.C., Eds.; Editorial Iberoamérica: Mexico, 1991; 45.
18. SAS Institute. *SAS User's Guide: Statistics*. 6.04. Cary, NC, 1990.
19. Tosi, E.; Re, E.; Tapiz, L.; Macias, S.; Ferreghini, M. Secado de Trigo en Secaderos de Flujo Cruzado. Propiedades que Modifica en el Grano y en la Harina. *Rev. Agroq. Tec. Alim.* **1986**, *26* (1), 139–147.
20. Fellow, P. Deshidratación. In *Tecnología del Procesamiento de los Alimentos*; Fellow P., Ed.; Editorial Acribia: Zaragoza, Spain, 1994; 290.
21. Lupano, B.C.; Añón, C.M. Denaturation of Wheat Germen Protein During Drying. *Cereal Chem.* **1986**, *63* (3), 259–263.
22. Halverson, J.; Zeleny, L. Criteria of Wheat Quality. In *Wheat Chemistry and Technology*; Pomeranz, Y., Ed.; American Association of Cereal Chemistry: St. Paul, MN, 1988, Vol. I, 15–45.
23. Hosney, R.C. Estructura de los cereales. In *Principios de Ciencia y Tecnología de los Cereales*; Hosney, R.C., Eds.; Editorial Acribia: Zaragoza, Spain, 1991, 11.

24. Campaña, E.L.; Sempé, E.M.; Filgueira, R.R. Physical, Chemical and Baking Properties of Wheat Dried with Microwave Energy. *Cereal Chem.* **1993**, *70* (6), 760–762.
25. Jeanjean, M.F.; Damidaux, R.; Feillet, P. Effect of Heat Treatment on Protein Solubility and Viscoelastic Properties of Wheat Gluten. *Cereal Chem.* **1980**, *57* (5), 325–331.
26. Kobrehel, K.; Bois, J.; Falmet, Y. Comparative Analysis of the Sulfur-rich Proteins of Durum and Bread Wheats: Their Possible Functional Properties. *Cereal Chem.* **1991**, *68* (1), 1–6.
27. Weegels, L.P.; Verhock, A.J.; Groot, A.M.G.; Hamer, J.R. Effects on Gluten of Heating at Different Moisture Content. 1. Changes in Functional Properties. *J. Cereal Sci.*, **1994**, *19*, 31–38.
28. Strecker, T.D.; Cavalieri, R.P.; Zollars, R.L.; Pomeranz, Y. Polymerization and Mechanical Degradation Kinetics of Gluten and Glutenina at Extruder Melt-section Temperatures and Shear Rates. *J. Food Sci.* **1995**, *60*, 532–557.
29. Bruce, M.D. A Model of the Effect of Heated, Air Drying on Bread Baking Quality of Wheat. *J. Agric. Eng. Res.* **1992**, *52*, 53–76.
30. Kent, L.N. La Cosecha y Molienda del Trigo. In *Tecnología de los Cereales*; Kent, L.N., Ed.; Editorial Acribia: Zaragoza, Spain, 1987; 69.
31. Ghaly, T.F.; Sutherland, J.W. Heat Damage to Grain and Seed. *J. Agric.* **1984**, *30*, 337–341.

Received July 19, 2000

Revised February 7, 2001

Accepted February 11, 2001