INSTITUTO INTERAMERICANO DE CIENCIAS AGRICOLAS - OEA
Representación en Colombia
PROGRAMA NACIONAL DE CAPACITACION AGROPECUARIA

Versión Preliminar

APUNTES SOBRE CONSERVACION DE GRANOS

Primera Parte

La respiración de los granos, su conservación en climas tropicales, el secamiento mediante corrientes de aire; el contenido de humedad del grano y del aire

Por: César Rodríguez
Mercadólogo PNCA

Bogotá, Septiembre de 1974

PARTE PRIMERA

Contenido **Pág.**

Prólogo..... i

I. La conservación de cereales como organismos vivos... III-A-1

A. Respiración de cereales..... III-A-1

1. Formación de CO_2..... III-A-1
2. Formación de agua..... III-A-4
3. Formación de Calor..... III-A-5

B. Efecto de los productos de la respiración..... III-A-5

C. La importancia del oxígeno..... III-A-7

D. Medidas para la supresión de la respiración durante el almacenamiento... ..... III-A-8

1. Conservación por exclusión de oxígeno..... III-A-9
2. Conservación por enfriamiento..... III-A-10
3. Conservación por secamiento..... III-A-10

II. La conservación de Granos en climas tropicales..... III-A-12

A. Definición del Problema..... III-A-12

B. Solución económica del problema... ..... III-A-13

III. El secamiento de granos mediante corrientes de aire.. III-A-15

A. Definición del problema..... III-A-15

B. Análisis de la operación..... III-A-15

C. La presión del vapor de agua en el grano..... III-A-16

D. La presión del vapor de agua en el aire..... III-A-17

Pág.

E. Leyes de los gases..... III-A-17

1. Ley de Boyle..... III-A-18
2. Ley de Charles..... III-A-19
3. Ley de Dalton III-A-20
4. Ley de Amagat..... III-A-23
5. Ecuación de los gases perfectos..... III-A-24

IV. El contenido de Humedad del grano..... III-A-26

A. El agua dentro del grano..... III-A-26

B. Cuantificación de la humedad del grano..... III-A-26

C. Medición de la humedad del grano..... III-A-28

1. Definición del problema..... III-A-28
2. Bases para el establecimiento de un sistema de medición..... III-A-30
3. Algunos sistemas comunmente usados..... III-A-38

a. De medida directa..... III-A-38
1) Sistemas de resistencia..... III-A-47
2) Sistemas de constante dieléctrica... III-A-47

V. El contenido de humedad del aire..... III-A-48

A. El aire seco y el aire ambiente..... III-A-48

1. Composición..... III-A-48
2. Propiedades físicas..... III-A-49
3. Peso molecular del aire seco normal..... III-A-49

a. Cómputo por peso..... III-A-49
b. Cómputo por volumen..... III-A-50

B. La humedad del aire ambiente..... III-A-50

1. Humedad absoluta..... III-A-50
2. Humedad de saturación del aire..... III-A-51
3. Presión de saturación del vapor de agua en el aire..... III-A-51
4. Humedad relativa del aire..... III-A-51

PROLOGO

La capacidad física instalada en el país, para secamiento, almacenamiento y conservación de granos, se duplicó durante los últimos siete años; paralelamente, el adiestramiento del personal responsable de la ejecución técnica en las nuevas instalaciones se incrementó, aún en mayor proporción.

Como consecuencia, podría pensarse que la tecnología aplicada a los procesos mencionados se evaluaría -y si fuera necesario se modificaría- para finalmente adecuarla a las características de la nueva infraestructura en particular, y -en general- a las condiciones del sistema de comercialización.

Inexplicablemente esto no se realizó. Dicha tecnología permanece inmodificable; su identificación total con los métodos propuestos tentativamente en la década 1940/50, para secar, almacenar y conservar granos en zonas no tropicales, es preocupante.

Aun cuando el problema de la conservación de granos en nuestro medio está lejos de hallarse solucionado, y sus implicaciones son cada vez más complejas y frecuentes, se continúa aplicando principios tecnológicos anticuados, cuyos fundamentos teóricos no han sido investigados (o debidamente ratificados) en climas tropicales; los resultados obtenidos en el tratamiento del problema son dudosos a menudo y su evaluación definitiva no se lleva a cabo.

Es posible explicar la situación de diversas maneras, pero muy difícil justificarla. Mientras no se retorne al estudio de la aplicación de los principios teóricos en nuestro medio, mientras no se avalúen las bondades de los procesos vigentes, y mientras no se introduzcan las mejoras técnicas indispensables, el problema persistirá: los criterios tecnológicos inoperantes darán lugar -como hasta ahora- al criterio empírico, casuístico y poco racional. La operación inadecuada restará importancia y utilidad a los programas de ampliación y mejoramiento de la infraestructura. Si se modernizan las instalaciones, y se adquieren más y mejores equipos para tratamiento y conservación, en esa medida será más inadecuada la tecnología del /50; y si paralelamente con ese crecimiento y ese mejoramiento parcial de la infraestructura física, no se desarrollan programas para concebir la tecnología adecuada, los costos de operación de la nueva infraestructura, irán en aumento hasta traducirse en márgenes no tolerables por el sistema de comercialización.

En estas líneas se ha insistido en la necesidad de volver sobre el estudio del problema; sólo con ese ánimo se entregan estos "apuntes sobre conservación de granos" para conocimiento, estudio y discusión.

Se pretende iniciar una serie de entregas, que permitan conocer los aspectos teóricos importantes en la conservación de granos y plantear futuros estudios sobre el tema. De ser posible, esta labor debe

extenderse a la traducción y publicación de información técnica, editada por centros de investigación y universidades del extranjero, y a la difusión del material existente en el país. Sería deseable que en el asunto tomaran parte todos aquellos grupos técnicos adscritos a entidades -públicas o privadas- del sector agropecuario, y particularmente del subsector del mercadeo de granos.

En principio se editan estas tres cartillas, con numeración continuada; sus objetivos específicos son: suministrar al lector los elementos de juicio indispensables para comprender el problema (primera cartilla), adentrarlo en la definición de términos y de variables utilizados en el estudio de la materia (primera y segunda cartilla) y darle la oportunidad de analizar la relativa validez de algunos de los procesos, cuya interpretación es incorrecta en nuestro medio (tercera cartilla). Como complemento se anexan cálculos sobre mediciones de variables y soluciones matemáticas a casos específicos.

Muy seguramente el técnico, encontrará conceptos conocidos en su totalidad; el autor en ningún momento pretende explicar asuntos novedosos, sino explicar correctamente los procesos habituales, en su relación con los principios teóricos.

También es posible que se encuentren transcripciones de autores conocidos, sin la correspondiente cita; o uso de métodos ya difundidos. Al respecto se hace público reconocimiento y se da el crédito

en estas líneas, para no complicar la presentación didáctica del material con llamadas adicionales excesivas.

Tan solo en la medida que los conceptos expuestos en estas cartillas sean objeto de estudio, análisis y discusión, podrá decirse que se ha logrado el objetivo.

CESAR O. RODRIGUEZ O.
César Rodríguez
Mercadólogo PNCA

I. LA CONSERVACION DE CEREALES CON ATENCION A SU CALIDAD DE ORGANISMOS VIVIENTES

A. La Respiración de los Cereales

El grano del cereal no es un cuerpo muerto, sino un organismo viviente con un gran acopio de sustancias nutritivas. La enunciación trascendente de la vida es el aliento. La respiración se verifica a costa de los hidratos de carbono contenidos en el grano. El almidón y el azúcar son descompuestos por el ingreso del oxígeno, en gas carbónico y agua, por cuyo efecto se produce un considerable aumento de calor. Este proceso ocurre con la ecuación:

Hidrato de carbono + oxígeno = gas carbónico + agua + calor

$$C_6H_{12}O_6 + 6O_2 = 6H_2O + 6CO_2 + \text{calorías}$$

La intensidad de respiración depende de la humedad y temperatura; cuanto más húmedo y más caliente el cereal, tanto más enérgica será la respiración. Pero también en cereales secos (de 14 a 15 por ciento de agua) se verifica la respiración en una proporción tal que con un almacenaje impropio, puede ser motivo de perjuicios o de disminución de calidad del cereal.

Como medida para la respiración pueden ser utilizados los productos provenientes de la misma (el gas carbónico, el agua o también el calor); por conveniencia se determina la magnitud de la respiración en pequeñas cantidades de cereales, por el gas carbónico y en masa más grande, por observación del ascenso de la temperatura.

1. La Formación del Gas Carbónico. En cada montón de cereales, en cada silo cargado, puede comprobarse una formación de gas carbónico por el cereal. Fueron encontrados, por ejemplo, en el aire existente entre los granos de un montón de cereal, cuyo contenido de agua era del 17.2 por ciento y la temperatura del 18.1 grado centígrado, un contenido de gas carbónico de 0.031 gramo por litro, mientras el aire de fuera contenía 0.003 gramos por litro.

Por ensayos fue determinada la cantidad de gas carbónico producido por un kilo de cereales en 24 horas, bajo diferentes condiciones, a saber: (Ensayo No. 1)

Con 14 a 15 por ciento de agua y 18°C		1,4 miligramos de CO_2
Con 14 a 15 por ciento de agua y 30°C		7,5 miligramos
Con 14 a 15 por ciento de agua y 40°C		20,0 miligramos
Con 15 a 15 por ciento de agua y 52°C		249,0 miligramos
11%	18°C	0,3 a 0,4 miligramos
16% 9%	18°C	123 miligramos
20,5%	18°C	159 miligramos
Con 14 a 15 por ciento	18°C	1,4 miligramos
33%	18°C	2.000 miligramos

A 0°C la respiración del cereal es igual a 0; también a 10°C es aún poco importante, pero a 20°C, la magnitud de la respiración sube considerablemente y a temperaturas todavía más altas, se eleva aún más fuertemente. De esto se deduce para el almacenamiento la moraleja: Cuando más baja la temperatura del cereal, tanto menor es la pérdida de su sustancia por la respiración, siendo casi eliminada al sostener fresco el cereal.

Cereales con 11 por ciento de agua respiran muy lento; con 17 por ciento de agua se desarrolla en el mismo tiempo y a 30 veces de gas carbónico, con el 20 por ciento de agua la cantidad es de 80 a 100 veces mayor; y con 33 por ciento la magnitud de respiración aumentará a 7.000 veces más. Pues, cuanto más bajo el contenido de agua, tanto menor es la respiración y con ésta, la pérdida de sustancias. Como otra moraleja para el almacenamiento de los cereales resulta el desecamiento de los mismos, cuando están por debajo del 14 a 15 por ciento de agua, las pérdidas por respiración durante el almacenaje para largo tiempo, son limitadas a un mínimo.

Hasta cierto punto la intensidad de la respiración depende también del espesor y de la composición del grano. Granos pequeños respiran más fuerte que los grandes; cebada rica en albumina más fuerte que la cebada pobre. Pero de influencia preponderante a la respiración y a las pérdidas ocasionadas por ésta, son los factores primeramente mencionados; humedad y calor. La elevación de temperatura es de menor importancia que un alto contenido de agua.

Estas circunstancias fueron señaladas por ensayos, como los siguientes: el contenido de agua de un grano fue elevado de 12.8 a 16.9 - 19.3 - 21.0 y 23.2 por ciento y en cantidades iguales de 500 gramos en botellas expuestas a las temperaturas de 8 - 19 24 - 31 y 37°C. Por medio de la introducción de aire, libre de gas carbónico, fue dos veces al día determinada la cantidad de gas carbónico desarrollado por el cereal. 1.000 gramos de grano, calculado en estado seco, produjeron en 28 días las siguientes cantidades de gas carbónico en miligramos: (Ensayo No. 2).

Contenido de agua	8°C	19°C	24°C	31°C	37°C
12.8	6	38	372	524	-
16.9	55	1.699	4.454	6.711	7.251
19.3	261	4.388	7.598	9.313	9.859
21.0	-	6.283	-	-	-
23.2	-	7.840	-	-	-

Estos ensayos muestran con claridad la influencia de los factores principales de la respiración: una elevación de la temperatura de 19 a 31°C y 16.9 por ciento de agua produjo solamente una cantidad cuadruple de CO_2, mientras un aumento del contenido de agua de 12.8 a 23.1/2 y temperatura de 19°C, produjo un aumento de 200 veces más la intensidad de la respiración.

Bajo las condiciones mencionadas en el ensayo, en el trascurso de 28 días los granos de mayor humedad sufrieron naturalmente perjuicios con disminución del poder germinativo y gran aumento de bacterias : (Ensayo No.3)

Después de 28 días de duración del ensayo	Contenido de agua del cereal	Poder germinativo %	Número de bacterias acidificantes en millones de un grado del cereal
Con 8°C	16,9	98	1,7
	19,3	98	9,3
Con 19°C	12,8	98	2,3
	16,9	84	49,3
	19,3	75	145,0
	21,0	71	501,5
	23,2	67	2.870,7
Con 24°C	16,9	79	-
	19,3	70	-
Con 31°C	16,9	16	-
	19,3	12	-
Con 37°C	16,9	5	-
	19,3	4	-

Este ensayo hace constar la disminución de la fuerza vital del cereal almacenado con alto contenido de agua y altas temperaturas, lo mismo que con la humedad crecida el desarrollo considerable de bacterias acidificantes. También por el olor de un poco agrio del cereal fue perceptible la presencia abundante de estas bacterias. El cereal tuvo durante cuatro semanas de almacenamiento una cantidad insuficiente de oxígeno a su disposición y sin duda tuvo lugar la respiración intramolecular, que es la disociación incompleta de la sustancia del cereal, en la cual los hidratos de carbono, sin entrada de oxígeno, son descompuestos según la siguiente ecuación de fermentación:

$$C_6H_{12}O_6 = 2CO_2 + 2C_2H_5OH$$

Azúcar = gas carbónico + alcohol

En los presentes ensayos fue de hecho perceptible al olor ligeramente aromático del alcohol.

En atención al almacenamiento resulta, pues, que cereales HUMEDOS ENCERRADOS por mayor tiempo son frecuentemente perjudicados, pierden en alto grado el poder germinativo, entran en fermentación láctica. Lo contrario, con HUMEDAD Y TEMPERATURA BAJA se evitan no solamente pérdidas en sustancias por respiración, sino también queda reducido a un mínimo el perjuicio por los microorganismos.

2. La Formación de Agua por Respiración en los Cereales. La ecuación de la respiración normal hace evidente, que en la respiración de los cereales, resulta fuera de CO_2 gran cantidad de agua y calor.

El ensayo siguiente ilustra la cantidad de agua producida fisiológicamente, convertida en humedad respiratoria; de un grano triturado, con 16,8 por ciento de agua, se puso parte en un frasco de vidrio bien tapado con algodón y tapa de vidrio, colocado en la estufa incubadora de cultivos a 25°C. Algunos días después apareció en el triturado junto a la pared del frasco la formación de hongos de moho, el cual siguió propagándose lentamente. Al terminarse el ensayo después de 10 días, el contenido de agua del triturado fue de 21.6 por ciento pues había aumentado considerablemente y la pérdida total del peso fue de 10.8 gramos. La cantidad de triturado empleada para el ensayo fue de 287.73 gramos calculado en 263.94 gramos, pues la pérdida de sustancia seca fue de 23.79 gramos igual a 8.27 por ciento. La cantidad de agua subió en 13.17 gramos y junto con la pérdida arriba mencionada de 18.8 gramos por CO_2 escapado, resultan 23.97 gramos, pues bastante exacto con la cantidad (23.79) de sustancia seca perdida por respiración. Suponiendo que la sustancia principal para la respiración fue el almidón resulta según la ecuación de respiración en 23.79 gramos de sustancia seca un aumento teórico de 14,27 gramos de agua pero el verdadero aumento fue de 13,17 gramos lo que da muy cerca el valor teóricamente esperado.

Este ensayo hace ver que por la respiración de cereales húmedos el contenido de agua puede acrecentar fuertemente. El agua respiratoria aumenta a su vez la respiración y el proceso continúa por el mismo acelerado.

En el caso arriba dicho, participaron también los mohos en el aumento de la intensidad respiratoria y en sus consecuencias. Los hongos descomponen fuertemente las sustancias del cereal y tienen alta virtud respiratoria. Por esto los cereales contagiados de hongos demuestran alta producción de CO_2 de agua. Estas circunstancias explican las dificultades que están causando tales clases de cereales en el almacenaje. Debido a la fuerte producción de agua, tanto por el cereal como por los hongos, solamente por secamiento artificial o por tratamiento con cantidades desproporcionadas de aire es posible llevarlos a condiciones normales.

3. La Formación de Calor. Para orientarse sobre el desarrollo del calor y de las pérdidas sufridas a consecuencia de la respiración de cereales húmedos que se presenta en el almacenaje, se verificó el siguiente ensayo: un pequeño silo de madera de 21 centímetros de altura y de 15.5 centímetros por 15.5 centímetros de base fue cargado con 4.266 kilos de grano de un contenido de agua de 20.04 por ciento. El silo fue colocado en una vasija de latón y aislado con algodón. En los primeros 4 días subió la temperatura en 4°C sobre la temperatura ambiente; para adaptarse después paulatinamente a las temperaturas del local del ensayo. En lugar de los 3.411 kilos de sustancia seca introducidos, se encontró al terminarse el ensayo solamente 3.355 kilos, pues había pérdida de 56 gramos, igual a 1.64 por ciento de sustancia seca. El centeno demostró fuerte olor a moho, algunos granos eran ocupados por el moho, el color no era ya fresco sino con matis ligeramente pardo.

El autocalentamiento antes descrito de los cereales es exclusivamente la consecuencia del acrecentado proceso de respiración originado por el exceso de agua, produciéndose más calor que no puede ser desviado hacia afuera. El calor producido se acumula en el interior de la masa del cereal, tanto más cuanto que el grano es mal conductor del calor.

B. Efecto de los Productos de la Respiración

Cada uno de los tres productos de la respiración, gas carbónico, agua y calor son de importancia en el trascurso del almacenamiento. El efecto del agua y del calor se manifiesta a simple vista, mientras que el del gas carbónico no es tan notorio en su aparición, sin carecer por esto de importancia. En un ejemplo con extremos consecuencias se caracteriza la importancia de estos productos.

Contemplando un montón alto de cereales cuyos granos tienen un contenido de agua cerca del 16 por ciento, a las capas interiores no llega el aire suficiente, por ejemplo

un cargamento de cereales sueltos en una embarcación. Por la respiración nace el calor, el cual se acumula en el interior del montón, debido a la mala conductibilidad del calor por los cereales. Este calor y a la vez el agua producida, incitan todavía más las funciones vitales del cereal y con el curso del tiempo se llega a la acumulación de agua y de fuerte calentamiento. La temperatura sube muchas veces tanto que sobrepasa el límite soportable de la piel humana. El cereal se encuentra en el estado de asfixia (estofar, evehar, rehogar). Los granos demuestran un color especial parto-castaño y el pardo amarillento y más o menos blando. Estos granos "quemados" no tienen sabor normal; sino extraño, penetrante y herrumboso (atizonados) y sólo aprovechable para forrajes. Al no ser voltcado a tiempo el cereal para enfriarlo y airearlo enérgicamente, seguirá el proceso de calentamiento más brusco y en el interior del montón se formará paulatinamente una masa negra, impropia para forraje. En esta fase, el proceso de calentamiento trascurre con rapidez y llega a veces a encenderse al extender el montón.

En la práctica se observa con más frecuencia el calentamiento de los cereales y muy raras veces deterioro total por autocalentamiento, lo que es solamente posible por indolencia o desconocimiento del tratamiento de los cereales.

El seguir de cerca los cereales, en autocalentamiento se puede constatar singular relación en la temperatura. La máxima no se encuentra cerca del punto central del montón de cereales, sino en la proximidad de la superficie. En una capa de maíz de dos metros de altura se encontró por ejemplo, 12.5 centímetros debajo de la superficie 41°C, en 25 centímetros 46°C, en 50 centímetros , 45°C, en 1 metro 40°C y en 1.50 metros 25°C., pues la temperatura del cereal crece con la altura de la capa y decrece en las capas superiores y en la superficie, porque allá tiene lugar una trasmisión de calor al aire ambiente y también por la evaporación activa de la humedad del cereal se produce en cierto grado frío, a causa de la evaporación. Como explicación de estas relaciones de la temperatura, bien puede darse como explicación admisible de la ascención de los gases calientes provenientes de la respiración de las capas inferiores del cereal. El vapor de agua que llevan los gases consigo reanima la respiración en las capas superiores y fomenta el alza de la temperatura.

Al contrario del cereal almacenado en montones, los cereales depositados en sacos arrumados en cruce y tratándose siempre con razón y contenido normal de agua, la temperatura casi siempre se sostiene en límites normales. Los canales de aire formados por los sacos permiten una aireación permanente y de este modo también la salida del calor de respiración.

Con el autocalentamiento de cereales viene muchas veces la formación del sudor. En el interior del montón es trasformada por la temperatura más alta existente allá, una parte del agua respiratoria del cereal en vapor de agua, el cual se difunde poco a poco hacia las partes exteriores del montón, tropezando con las capas más frías y condensadores de éstas. Como ya se ha dicho, están los cereales húmedos debido al frío producido

por la evaporación del agua más fresca que se encuentra en la superficie y en éstas el vapor de agua saturado en el aire que viene del interior del montón, debía ser condensado en forma de agua líquida, (gotas de sudor) pero el sudor no se forma en la superficie propiamente dicha. En la mayoría de los casos en 2 ó 3 centímetros debajo de la superficie la temperatura es tan baja, que allí se realiza la condensación del vapor de agua y en tiempos frescos, en capas más profundas (10 a 15 metros). Con el sudor se está formando una zona con crecida humedad y por consiguiente un foco secundario de infección en donde los hongos de moho y bacterias principian inmediatamente su obra. Al reconocer la formación de sudor, debe comenzarse la volteada del moho para salvar el cereal. En silos cerrados, (sin instalación de ventilación adecuada) indica la formación del sudor un peligro mucho más grave debido a las altas capas en que se encuentra el cereal. Los focos de calor en el interior no son perceptibles sino cuando la formación del sudor ha llegado a la superficie y el cereal ya ha sufrido daños graves.

El control de la temperatura en silos cerrados es indispensable y se verifica por medio de instalaciones de teletermómetros especiales puestos en diferentes alturas del silo.

El autocalentamiento de los cereales debe impedirse a todo costo, ya que debido a éste la intensidad respiratoria es demasiado crecida y puede causar una fatal dislocación de la humedad, tal como se manifiesta por la formación del sudor. El control de la respiración por mediación de la temperatura de los cereales almacenados es sencillo en verificarse y fácil de comprobar la EXACTA OBSERVACION DE LA TEMPERATURA EN CEREALES ALMACENADOS DEBE SER RIGOR. Entonces es cosa fácil percibir oportunamente un calentamiento y combatir esta calamidad adoptando los trabajos indicados para lograr un pronto enfriamiento, sea por volteada o una mayor extensión o traslado a otro sitio y extenderlos, o también de un silo a otro con el trasporte neumático.

C. La Importancia del Oxígeno

Según las explicaciones anteriores, el oxigeno es el factor más importante para la respiración, porque sin oxígeno no hay respiración en el sentido normal. Cuando está almacenado un cereal bajo la exclusión de oxígeno, se impedirá la formación de los productos respiratorios y como consecuencia el peligro de alza de la temperatura y el aumento del contenido de agua será imposibilitado.

Para orientarse sobre estas circunstancias fue verificado el siguiente pequeño ensayo: 350 gramos del cereal con 17.5 por ciento de agua fueron encerrados en botellas termos; en algunas botellas el aire entre los granos fue desalojado por gas carbónico. En estas botellas no subió la temperatura del cereal, mientras el cereal en la botella que contenía el aire se elevó hasta 2,5°C, sobre la temperatura ambiente. Por la introducción del gas carbónico fue suprimida la actuación de la respiración normal.

Almacenando cereales húmedos en grande escala bajo la exclusión de oxígeno, como en silos cerrados, resultan condiciones muy parecidas. La respiración muy fuerte al principio está consumiendo el oxígeno del aire existente en el silo y en corto tiempo la masa del cereal se encuentra en una atmósfera casi pura de gas carbónico-nitrógeno y la respiración ulterior es suprimida. Los hongos de moho como organismos aereobianos no tiene posibilidades de desarrollo por falta de oxígeno. Pero la humedad que existe alcanza para favorecer el crecimiento de otros organismos anaerobianos como lo prueba también el ensayo número 3. Entre estos microorganismos, llegan pronto las bacterias de ácido láctico a la supremacía y el resultado de este almacenamiento de cereales húmedos en silos cerrados, por prolongado tiempo, resulta ser una masa elástica de cereales.

En cereales muy secos con 10 a 12 por ciento de agua, el desarrollo de bacterias de ácido láctico y con esto la formación de ácido láctico es de tal modo paralizada, que masas grandes de cereales pueden ser almacenadas con exclusión de oxígeno con temperaturas relativamente bajas (10 a 15 °C), sin sufrir en su aptitud para la alimentación humana. Pero la seguridad de este sistema de almacenamiento depende de determinadas circunstancias que son, la poca humedad de los cereales y la temperatura reinante durante el almacenaje.

D. Medidas para la Supresión de la Respiración durante el Almacenamiento

En la respiración están fundados los principales peligros para la conservación de cereales. El objeto esencial del almacenamiento consiste por consiguiente en una amplia disminución de la respiración. Todos los medios por los cuales se logra esta finalidad pueden valer como medios de conservación. Ante todo el oxígeno, pero también el calor y la humedad son necesarios para la respiración. Cuando uno de estos factores no está presente suficientemente, la respiración se reducirá a un mínimo y con esto a la vez se evitará el peligro de daño en los cereales. Según esto resultan las siguientes posibilidades de conservación:

1. Por exclusión de oxígeno: el almacenaje se verificará bajo aislamiento del oxígeno.

2. Por enfriamiento: el cereal almacenado es llevado a temperaturas bajas.

3. Por secamiento: se está almacenando cereales secos.

Estos tres métodos serán discutidos en seguida:

1. Conservación por exclusión de oxígeno. El almacenamiento de cereales bajo aislamiento del aire es conocido desde tiempos remotos. En los depósitos de granos de los viejos egipcios el cereal fue almacenado en recintos completamente encerrados y aislados del aire de fuera. Las basijas de arcilla cocida de los griegos después de llenarlas con cereales eran tapadas con tamo, arena y barro. Los hoyos en tierra hasta hoy utilizados en Africa Septentrional, España e Italia (Feggia) para almacenaje de cereales son también bajo aislamiento del aire y al mismo tiempo relativamente frescos. De la misma especie son los hoyos en tierra en Hungría. El sistema de cubrir los cereales con tamo y arena se observa hasta hoy en la India y Persia, lo que conduce a una acumulación de gas carbónico en el cereal. Los Moros llamaron los hoyos en tierra para el almacenaje de cereales "Syles", expresión que luego fué modificada en silos.

De estas viejas experiencias se hizo uso en la construcción moderna de silos impermeables al gas (herméticos).

De los silos herméticamente cerrados no es necesario desalojar el oxígeno por gas carbónico, auncuando es posible hacerlo, porque el propio cereal lo produce y verifica la gasificación en forma de "autogasificación", como se explicó más atrás. Almacenando cereales en silos cerrados en tiempo relativamente corto estará gastado por la respiración del cereal el oxígeno existente en el silo y pronto se producirá una atmósfera de gas carbónico-nitrógeno. En esta mezcla de gases, la respiración y como consecuencia natural de éste, el desarrollo de calor ha llegado a paralizarse y así pues el cereal ha entrado en conservación. Especialmente en silos completamente herméticos (de acero u hormigón) muy pronto se presentan estas circunstancias.

Los cereales secos así almacenados no son perjudicados en su poder germinativo, ni en capacidad de panificación. El arroz almacenado bajo la exclusión del oxígeno había retenido plenamente su poder germinativo lo que demuestra el estado de salud, después de cuatro años.

Es de observar que en este sistema de almacenamiento las celdas de los silos deben ser cargadas siempre por completo, a fin de que la provisión de oxígeno sea pequeña, y debe almacenar en ellos cereales muy secos, con un máximo de humedad del 12 por ciento y ser bien enfriados antes de almacenarlos en estos silos.

El almacenamiento bajo exclusión del aire no solamente disminuye las pérdidas por respiración, sino que ofrece además la ventaja de que los cereales son alejados de las influencias externas y cuando el contenido de agua no pasa del 12 por ciento no necesitan ser movidos. Este sistema está indicado principalmente para almacenaje prolongado y para empresas grandes. Como complemento de la conservación por secamiento y por el aislamiento de las influencias atmosféricas resulta una seguridad especial.

2. Conservación por enfriamiento. Para la casi completa supresión de la respiración, es suficiente la temperatura alrededor de 5°C. Después de prolongado el tiempo de almacenamiento en frío, los cereales demuestran buenas condiciones, tanto en la normalidad del poder germinativo como en el impulso de fermentación en la panificación, lo que demuestra que en los cereales no se han verificado conversiones biológicas.

La supresión de la respiración por temperaturas bajas, como medio dado por la naturaleza, ha jugado un papel primordial en países como Noruega, Suecia, Filandia, Rusia y Canadá. Cereales fríos (0°C) pueden quedarse almacenados por varios años, sin peligro para ellos. Como ventaja resulta también, que los insectos nocivos son afectados por la temperatura baja y con frío prolongado pueden morir o por lo menos se evita la propagación cuando están presentes.

El almacenaje en frío en regiones templadas y calientes está asociado a gastos considerables, siendo por tanto económicamente inferior al procedimiento de conservación por secamiento. Además existe la dificultad de que cuando el cereal frío entra en contacto con aire caliente, la condensación del vapor de agua al cereal es inevitable, formación de rocío (por ejemplo, el cereal con 3°C y el aire con 20°C y 75 por ciento de humedad relativa) y como consecuencia échase a perder fácilmente el cereal, especialmente en trasportes largos por ferrocarriles o ríos, donde queda limitada la posibilidad de dar al cereal un tratamiento especial. La adaptación de la conservación en frío queda limitada a industrias en las cuales el cereal sacado del almacenaje, llegue sin pérdida de tiempo a la elaboración.

Almacenaje en frío, de cereales húmedos con más de 16 a 17 por ciento de agua debe ser evitado, porque el desarrollo de ciertos hongos de moho por temperaturas de 0 a 5°C no queda completamente contrarrestado, además los cereales húmedos en silos, presentan mucha dificultad a la salida o descargada, por la formación de "puentes".

3. Conservación por secamiento. Acabados de trillar, los cereales contienen normalmente más del 16 por ciento de agua y por lo tanto no tienen estabilidad para un almacenaje durable bajo las condiciones usuales por causa de la respiración fuerte y sus consecuencias. Los cereales deben ser secados lo antes posible para lograr un almacenaje favorable.

Almacenados los cereales frescos en salones "abiertos" (secaderos) se obtiene el secamiento por el aire que pasa por el salón en tiempo seco, combinando esto con volteadas frecuentes de los cereales extendidos en capas delgadas de 25 a 30 centímetros. En tales circunstancias el contenido de agua decrece a 14.15 por ciento y tanto más acelerado cuanto más caliente y seco está el aire de fuera que atraviesa el salón. También en tiempo relativamente húmedo puede ser posible desecar los cereales por volteadas diarias, pero bajo la condición previa que la temperatura del cereal no pase de 8°C, porque temperatura más alta que ésta, intensifica la rapidez del crecimiento de los hongos de moho de tal manera, que dañan en corto tiempo el cereal, antes que los mohos

puedan ser privados de sus condiciones de vida, a causa del secamiento retardado por el tiempo húmedo. Tampoco una disminución de la capa de 10 a 15 centímetros puede impedir el enmohecimiento de los cereales. En este caso ayudará únicamente un pronto secamiento artificial.

Cereales recién cosechados y algo húmedos no pueden ser depositados en silos cerrados, porque en estos no hay manera de conducirles por secamiento al estado normal de conservación. Al almacenaje en silos, cerrados, debe proceder por conveniencia al almacenaje en salones "abiertos" y secamiento artificial. En casos dudosos es más razonable emplear el secamiento artificial sin pérdida de tiempo y no hacer experimentos, los cuales muchas veces han conducido a descomponer grandes masas de cereales. El trabajo es más acertado cuando se eliminan desde el principio todas las circunstancias que pueden complicar el almacenamiento. Debe ser principio básico el de secar los cereales con más del 19 por ciento de agua.

Por secamiento artifical se entiende no solamente el empleo de los diversos equipos de secadores para cereales por medio de aire caliente, sino también las instalaciones de aireación de graneros y silos aireados, por medio de aire absolutamente seco. Es natural que soplando o aspirando aire seco y de temperatura relativamente baja a través de los cereales, tienen que llevarse cantidades mayores de agua del cereal asi: el desecamiento es acelerado y la temperatura del cereal decrece. El aprovechamiento de aire absolutamente seco para secamiento no es novedad ninguna y trabajan estas instalaciones según el tamaño del establecimiento, con cal viva (CaO), cloruro de calcio (CaC12), ácido sulfúrico (H2804) o máquinas frigorígicas. Los trabajos de volteadas frecuentes y los gastos por ello ocasionados son evitados de una vez para siempre por secamiento suficiente y almacenamiento en silos hasta que sean llevados a la elaboración. La economía de esta medida es dudosa cuando los cereales después de secarlos son guardados en almacenaje abierto (salones, graneros), debido a que el agua perdida por el secamiento, es reemplazada en parte por absorción de agua de la atmósfera.

En general, la conservación por medio de secamiento tiene amplia significación. Sobre todo una determinada sequedad del cereal es indispensable, si es que el almacenaje debe ser llevado a la práctica. La sola sequedad puede ser suficiente para la conservación del grano, pero no la sola exclusión del aire por refrigeración sin tener en cuenta otros factores. Sólo en cierta combinación con la conservación por secamiento se obtiene de estos dos últimos métodos principales de almacenamiento la seguridad técnica que es necesaria para la cerificación de almacenaje en grande escala.

mgm
VI.10.74

II. LA CONSERVACION DE GRANOS EN CLIMAS TROPICALES

A. Definición del Problema

Del análisis de la ecuación de respiración de los cereales, se dedujo la importancia que tienen -para la conservación- el contenido de humedad y la temperatura de la masa de grano.

Igualmente se vió cómo, conservar un grano consiste -básicamente- en detener su proceso respiratorio y contrarrestar los efectos indeseables de ese proceso, hasta donde sea posible.

(En otros términos, se definió conservar un grano, como impedir la formación de CO_2, de agua y de calor, que se efectúa a expensas de la materia seca del cereal).

Si se observa que la respiración se lleva a cabo más o menos rápidamente, según la menor o mayor cantidad de agua del grano, según su menor o mayor temperatura y según la menor o mayor cantidad de oxígeno que le rodee, se concluye que la forma ideal de conservar un grano consiste en almacenarlo con un contenido de humedad y una temperatura tan bajas que su respiración disminuya a tal punto que sus efectos sean mínimos (medidos en términos del CO_2 , H_2O y calor producido) cuando la cantidad de oxígeno que rodea al cereal es mínima.

En zonas templadas la conservación del grano se simplifica pues es factible almacenarlo a temperaturas bajísimas (5°C hacia abajo) y mantenerlo así durante seis meses por lo menos, en silos herméticos; en esas condiciones los contenidos de humedad aconsejables para almacenamiento son mayores que los requeridos en las zonas tropicales donde es imposible almacenar naturalmente a esas temperaturas y/o mantener por algún tiempo esos niveles de calor en la masa del cereal.

En el trópico los cambios bruscos en la temperatura ambiente aceleran la actividad vital de los granos y con ella su respiración; esto se traduce en aumentos de temperatura de la masa de cereal, relativamente rápidos. Si a lo anterior se suma la imposibilidad de iniciar el almacenamiento con temperaturas ideales en el grano, se concluye que en períodos cortos este alcanzará temperaturas altas que ponen en peligro su calidad final; el peligro será mayor en la medida en que el contenido de humedad del grano sea mayor.

Del análisis del problema en el trópico se concluye que el asunto se plantea a nivel de solución, así:

Es necesario iniciar el almacenamiento con contenidos de humedad tan bajos que aún con las temperaturas iniciales un poco altas (15°C y más) se logre retardar el proceso respiratorio de tal forma que el proceso de calentamiento sea lo más lento posible y -durante el almacenamiento- controlar la temperatura de la masa del cereal y proceder a remover el calor excesivo de la misma.

Entonces el problema asume, en la mayoría de los casos, alguna de las dos formas siguientes:

1. Se tiene una masa dada de grano con una humedad, expresada en porcentaje, H%; se ha establecido previamente que, dadas las condiciones, tan solo es factible conservar ese grano adecuadamente en almacenamiento cuando su humedad es h% o menos.

En el caso que H sea mayor que h, esto es que el contenido de humedad del grano en un momento dado sea mayor al contenido de humedad mínimo aconsejable para su almacenamiento, es necesario eliminar de la masa de grano su exceso de humedad respecto a h. Dicho de otra manera, es necesario secar la masa de grano hasta su nivel seguro de humedad para almacenamiento.

2. Se tiene una masa de grano cuya temperatura está aumentando rápidamente, con lo cual corre el peligro de perderse cualitativa y cuantitativamente. Se hace necesario tomar medidas a fin de controlar ese aumento de temperatura y de disminuir luego la temperatura física de la masa de grano hasta un nivel seguro para el almacenamiento.

Para lograr tanto el control del aumento como la disminución deseada, ha de empezarse por determinar las causas del aumento (insectos, mohos, bacterias, humedad excesiva, etc.) para controlarlas y estar entonces en capacidad de entrar a buscar el descenso de la temperatura en la masa del grano.

B. Solución Económica del Problema

Tanto el control de la temperatura, como el de la humedad de la masa del grano pueden lograrse de diversas formas más o menos ventajosas según las disponibilidades de equipo y las condiciones climáticas del sitio donde se proponga el proceso.

Así, para el secado de granos puede pensarse en utilizar sistemas al vacío que permitan la evaporación del agua contenida en la masa de grano, mediante la reducción de la presión del aire que la rodea, con lo cual la temperatura de ebullición y de evaporación del agua se hace notoriamente más baja, hasta llegar un momento en el cual

se lleva a cabo a la temperatura que posee la masa del grano; de esta manera, sin necesidad de variar la temperatura de la masa de grano, es posible eliminar de ella su exceso de humedad. Como este sistema, existen gran cantidad de procesos diferentes que, mediante el aprovechamiento de las características físicas o químicas del agua, del grano o de ambos, eliminan de una u otra forma los excesos de humedad y contrarrestan sus efectos sobre la calidad final del producto a conservarse.

Análogamente, para el control de la temperatura en una masa de grano se utilizan diversos procedimientos, que aprovechan para alcanzar su cometido las propiedades físicas y químicas del grano y de las sustancias que lo rodean; sistema lógico parece la refrigeración de la masa del grano, que permita disminuir la temperatura hasta un nivel deseado, y además, conservar en adelante la temperatura en ese nivel. Sin embargo, por razones de costos, la refrigeración como medio para controlar y mantener las temperaturas deseadas durante el almacenamiento de granos no ha logrado imponerse, como tampoco lo ha logrado -por la misma razón- el sistema al vacío para el secado de granos.

En el caso que nos ocupa, el procedimiento para secar y enfriar granos, que más se ajusta a las necesidades del trópico, por sus características propias y por los costos relativamente bajos, utiliza corrientes de aire, ambiente o previamente acondicionado según el caso, que atraviesan la masa del grano y remueven sus excedentes de agua (secamiento) y/o de calor (enfriamiento).

VI.11.74
mgm

III. EL SECAMIENTO DE GRANOS MEDIANTE CORRIENTES DE AIRE

A. Definición del Problema

En realidad, como se ha definido anteriormente, se pretende hacer pasar a través de la masa de grano corrientes de aire, con el objeto de que remuevan su humedad parcialmente; entorno al proceso surgen los siguientes interrogantes:

-Todo aire que atraviesa una masa de grano necesariamente la seca?

-Si no necesariamente la seca, entonces qué condiciones debe reunir el aire para que el secamiento se efectúe?

La solución a esos interrogantes tan solo se halla mediante un análisis en detalle del proceso, efectuado en base a los elementos que participan en él y de su mecánica.

B. Análisis de la Operación

En este tipo de proceso fundamentalmente participan dos elementos:

1. La masa de grano que es una mezcla de materia seca (carbohidratos, almidones, azúcares, etc.) y agua -en estado líquido algunas veces- y casi siempre en estado de vapor (esta agua constituye la humedad del grano).

2. El aire que se forza a través de la masa de grano y que es en sí mismo una mezcla de aire seco (mezcla de gases tales como: oxígeno, nitrógeno, y otros según se verá luego), y agua en forma de vapor (que constituye la humedad del aire).

El vapor de agua contenido en el grano ejerce presión sobre las paredes del grano (esta presión equivale a la ejercida por cualquier gas sobre las paredes del recipiente que lo contiene). Por su parte, el vapor de agua contenido en el aire ejerce a su vez presión dentro de la mezcla, y esta presión se ejerce finalmente sobre cualquier cuerpo que entre en contacto con ese aire húmedo.

Entonces el vapor de agua contenido en el grano tiende a salir y pasar al aire que rodea la masa de grano, mientras que el vapor de agua contenido en el aire tiende a entrar al grano. Así se concluye que del proceso puede esperarse cualquiera de los siguientes resultados:

1. El vapor de agua contenido en el grano ejerce una presión mayor, sobre las paredes del grano, que la ejercida por el vapor de agua contenida en el aire que lo rodea; en este caso el vapor de agua del grano sale y pasa al aire exterior (proceso de secamiento: el contenido de humedad del grano disminuye en el proceso).

2. La presión ejercida por el vapor de agua contenida en el grano es igual a la presión ejercida por el vapor de agua contenido en el aire que lo rodea; en este caso hay dos presiones iguales y opuestas que se anulan: la del vapor de agua del grano que tiende a salir y la del vapor de agua del aire que tiende a entrar al grano (punto de equilibrio: tanto la humedad del grano como la del aire permanecen constantes no importa la cantidad de aire que atraviese la masa de grano).

3. La presión del vapor de agua contenido en el grano es menor que la presión del vapor de agua contenido en el aire. En este caso el vapor de agua contenido en el aire penetra en el grano (proceso de humedecimiento de grano: el contenido de humedad del grano aumenta con el proceso).

De lo anterior se concluye que la capacidad de un aire para secar una masa de grano depende de la presión ejercida por el vapor de agua contenido en el grano que se compara con la presión ejercida por el vapor de agua contenido en el aire.

C. La Presión de Vapor de Agua en el Grano

En general, la presión ejercida por el gas es función directa de la masa de gas presente por unidad de volumen y de la temperatura a la cual se encuentra el gas en cuestión (leyes de los gases). Aplicando estos principios a los casos específicos de los granos se concluye que la presión que ejerce el vapor de agua que contienen es función directa de la masa de vapor de agua presente (humedad del grano) y de la temperatura del grano (que es la misma temperatura del vapor de agua del grano).

Es lógico suponer que la presión ejercida por el vapor de agua contenido por el grano será mayor en la medida en que aumenta la cantidad de vapor presente (la masa de vapor o humedad del grano) y/o la temperatura del grano. De la misma forma debe esperarse que la presión ejercida por el vapor de agua en un grano disminuya en la medida en que disminuya la humedad del grano y/o su temperatura.

De todo lo anterior se concluye que para una clase de grano previamente establecida (por ejemplo, maíz o arroz, etc.) con un contenido de humedad y una temperatura dados, el vapor de agua presente ejerce una presión que permanece constante, en la medida en que dichas condiciones de humedad y temperatura del grano permanezcan constantes.

De esta forma se deduce la importancia que dentro del estudio del secamiento tiene el definir, cuantificar y medir tanto la humedad del grano como su temperatura con miras a predecir -mediante la presión ejercida por el vapor de agua contenido en el grano- su comportamiento durante el proceso.

D. La Presión de Vapor de Agua en el Aire

Si se aplican los mismos principios teóricos que rigen el comportamiento de las presiones en los gases, al caso específico del vapor de agua presente en el aire, se concluye que dicha presión depende en definitiva de la masa de vapor de agua presente en la unidad de volumen de aire (humedad del aire) y de su temperatura (temperatura del aire).

Ha de esperarse que la presión ejercida por el vapor de agua presente en el aire sea mayor o menor en la medida en que aumenta o disminuya la cantidad de vapor de agua presente en la unidad de volumen de aire, esto es, en la medida que aumente o disminuya la humedad del aire, y/o su temperatura.

De igual forma es correcto afirmar que para unas condiciones dadas de humedad y temperatura en el aire, la presión ejercida por el vapor de agua permanecerá constante en la misma medida en que permanezcan constantes esas condiciones de humedad y temperatura.

También en este caso se deduce la importancia que dentro del estudio de secamiento tiene definir, medir y cuantificar la humedad del aire y su temperatura con miras a -en base a la presión ejercida por el vapor de agua- determinar el comportamiento del aire en el proceso.

E. Leyes de los Gases

En desarrollo del presente capítulo hemos hecho referencia a los principios teóricos que rigen el comportamiento en la presión de los gases; estos principios teóricos serán utilizados aún con mayor frecuencia en los próximos análisis de la operación del secado, por esta razón es conveniente -antes de seguir adelante- profundizar en el conocimiento de estas teorías.

Además, si se observa que dentro del rango de temperaturas de 0°C a 300°C (rango en el cual se efectúan los procesos de secado de granos) el aire se comporta fundamentalmente como un gas perfecto y que las mezclas de vapor de agua y aire seco (aire ambiente) se apartan tan poco de ese comportamiento que la diferencia es

despreciable en cálculos aproximados, se concluye que tanto el comportamiento del aire seco, como el del vapor de agua y el del aire ambiente, puede predecirse con bastante exactitud, -dentro del rango anotado de temperaturas- en base a las leyes que rigen el comportamiento de los gases perfectos. Esta coyuntura facilita en gran medida el análisis de los procesos de nuestro interés y por ello se estudian a continuación las leyes de los gases perfectos.

1. Ley de Boyle. Relación volumen con presión a temperatura constante.

Enunciado: A temperatura constante, la presión ejercida por un gas es inversamente proporcional a su volumen específico. Esta ley se expresa matemáticamente así:

$$V = \frac{K}{P} \qquad (1)$$

donde V es el volumen específico del gas (volumen ocupado por unidad de masa), P es la presión ejercida por el gas (sobre las paredes del recipiente real o teórico que lo contenga) y K es la constante de proporcionalidad (particular al gas en cada temperatura).

A partir de la expresión matemática anotada, supongamos una masa dada de un gas determinado que en el momento 1 ejerce una presión P1 cuando su volumen específico es V1, entonces tendremos:

$$V1 = \frac{K1}{P1} \qquad (2)$$

Análogamente, supongamos la misma masa del mismo gas, en un momento 2, cuando ejerce una presión P2 y su volumen específico es V2, luego

$$V2 = \frac{K2}{P2} \qquad (3)$$

si suponemos que la temperatura del momento 1 es igual a la temperatura del momento 2 (temperatura constante) concluimos que K1 = K2 = K, y podemos despejar de (2) y (3) respectivamente:

$$K1 = V1P1 = K \qquad (4)$$

$$K2 = V2P2 = K \qquad (5)$$

o igualando (4) con (5) tendremos

$$V1P1 = V2P2 \qquad (6)$$

nos indica ahora esta expresión, que una masa de un gas que ejerce una presión P1 cuando ocupa un volumen V1, ejercerá una presión P2 cuando ocupe un volumen V2; obsérvese que si V1 es mayor que V2, esto es si el volumen absoluto ocupado por la masa de gas ha aumentado, entonces necesariamente P2 es menor que P1, esto es que la presión ejercida por la masa de gas ha disminuído; recuérdese que la expresión (6) es valedera solamente cuando la temperatura del gas permanece constante.

Dicho de otra forma, una masa dada de un mismo gas puede confinarse en diferentes volúmenes, y en cada caso, la presión ejercida por la masa de gas será inversamente proporcional al volumen que ocupe. Así una masa de gas confinada en un pequeño volumen ejercerá una presión mayor a la que ejercería si, la misma masa, estuviera confinada en un volumen mayor y a la misma temperatura; insistimos en el requisito de temperatura constante, pues de otra forma el comportamiento de la masa de gas no estará dado por la ley de Boyle solamente.

2. Ley de Charles. Relación volumen con temperatura a presión constante. Enunciado: A presión constante, el volumen específico de un gas es directamente proporcional a la temperatura absoluta del gas. Esta ley se expresa matemáticamente así:

$$V = KT \qquad (7)$$

donde V es el volumen específico del gas (volumen ocupado por unidad de masa de gas), T es temperatura absoluta del gas (expresada en grados kelvin = 273 + grados centígrados) y K es la constante de proporcionalidad (particular al gas para cada presión dada).

Si, a partir de la expresión matemática (7), suponemos una masa de un gas que en el momento 1 tiene una temperatura absoluta T1 y un volumen específico V1, tendremos:

$$V1 = K1\ T1 \qquad (8)$$

análogamente, si suponemos la misma masa del mismo gas, en el momento 2 cuando su temperatura absoluta es T2 y su volumen específico es V2, se deduce:

$$V2 = K2\ T2 \qquad (9)$$

si se adopta que la presión ejercida por la masa del gas en el momento 1 es igual a la presión ejercida por la masa del gas en el momento 2, (presión ejercida por la masa del gas es constante) se concluye que K1= K2= K, y podremos despejar de (8) y (9) respectivamente:

$$K1 = \frac{V1}{T1} = K \qquad (10)$$

$$K2 = \frac{V2}{T2} = K \qquad (11)$$

e igualando (10) con (11) tendremos:

$$\frac{V1}{T1} = \frac{V2}{T2} \qquad (12)$$

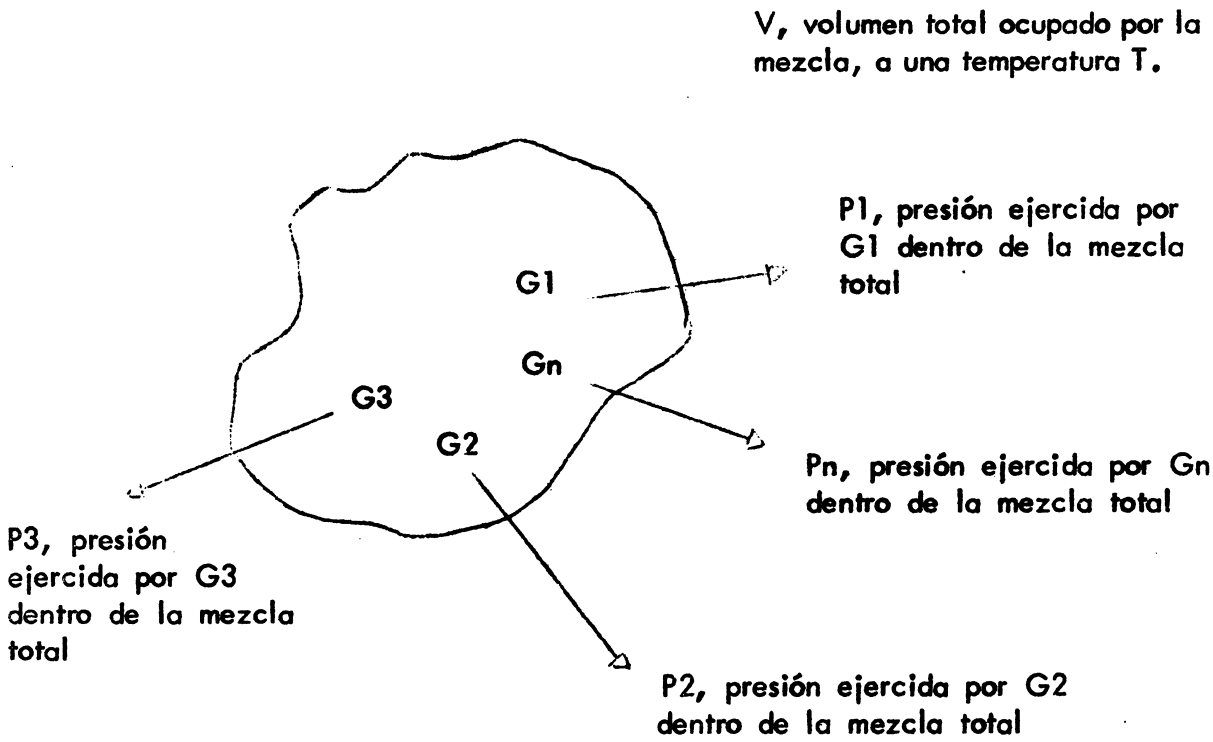
y por tanto

$$V1\ T2 = V2\ T1 \qquad (13)$$

Esta expresión indica que si se desea mantener constante la presión ejercida por una masa de gas, es necesario variar el volumen de confinamiento de la masa de gas cada vez que se altera su temperatura; de igual forma señala que los cambios experimentados por el volumen específico del gas, cuando la presión del gas permanece constante, son directamente proporcionales a los cambios en la temperatura absoluta del gas. Dicho de otra forma, si deseamos mantener constante la presión ejercida por una masa dada de gas, cada vez que aumente su temperatura absoluta, deberá aumentarse el volumen de confinamiento de la masa del gas; de la misma forma, deberá disminuirse el volumen de confinamiento de la masa dada de gas, cuando su temperatura absoluta disminuye y se desea mantener constante su presión.

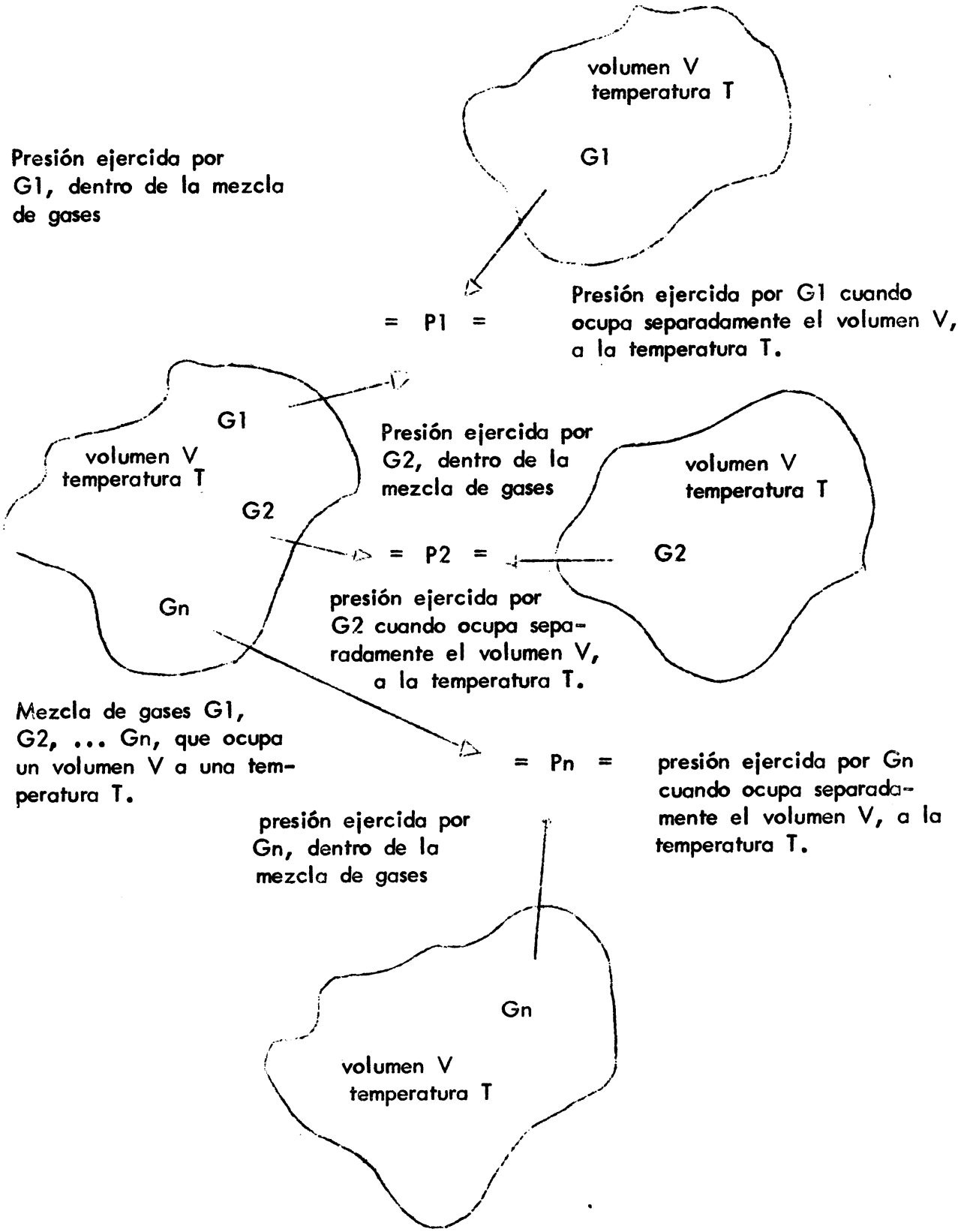
3. Ley de Dalton. Presiones parciales en una mezcla de gases perfectos. Enunciado: Teniendo un volumen V ocupado por una mezcla de n gases diferentes, de tal forma que la mezcla contenga una masa G1 de un gas, una masa G2 de otros gases, ... y una masa Gn de otro gas, y si la temperatura de la mezcla es T, la presión P1 ejercida por G1 dentro de la mezcla, es la misma presión que ejercería G1 si se confinara él solo dentro del volumen V, a la temperatura T; análogamente la presión P2 ejercida por G2 dentro de la mezcla, es la misma presión que ejercería G2 al confinársele solo dentro del volumen V., a la misma temperatura T de la mezcla. Las presiones ejercidas por G1, G2, G3, ... y Gn, esto es P1, P2, P3,... y Pn respectivamente, se denominan presiones parciales ejercidas por los gases que conforman una mezcla. En base a lo anterior ya nos es posible enunciar la Ley de Dalton así: En una mezcla de gases perfectos, cada una de las masas de gases componentes ejerce la misma presión que ejercería si se encontrara solo, a la misma temperatura de la mezcla, ocupando el volumen total de la mezcla.

Figura 1



"Dentro de una mezcla de gases perfectos, cada gas componente de la mezcla ejerce una presión". (Figura 1)

Figura 2

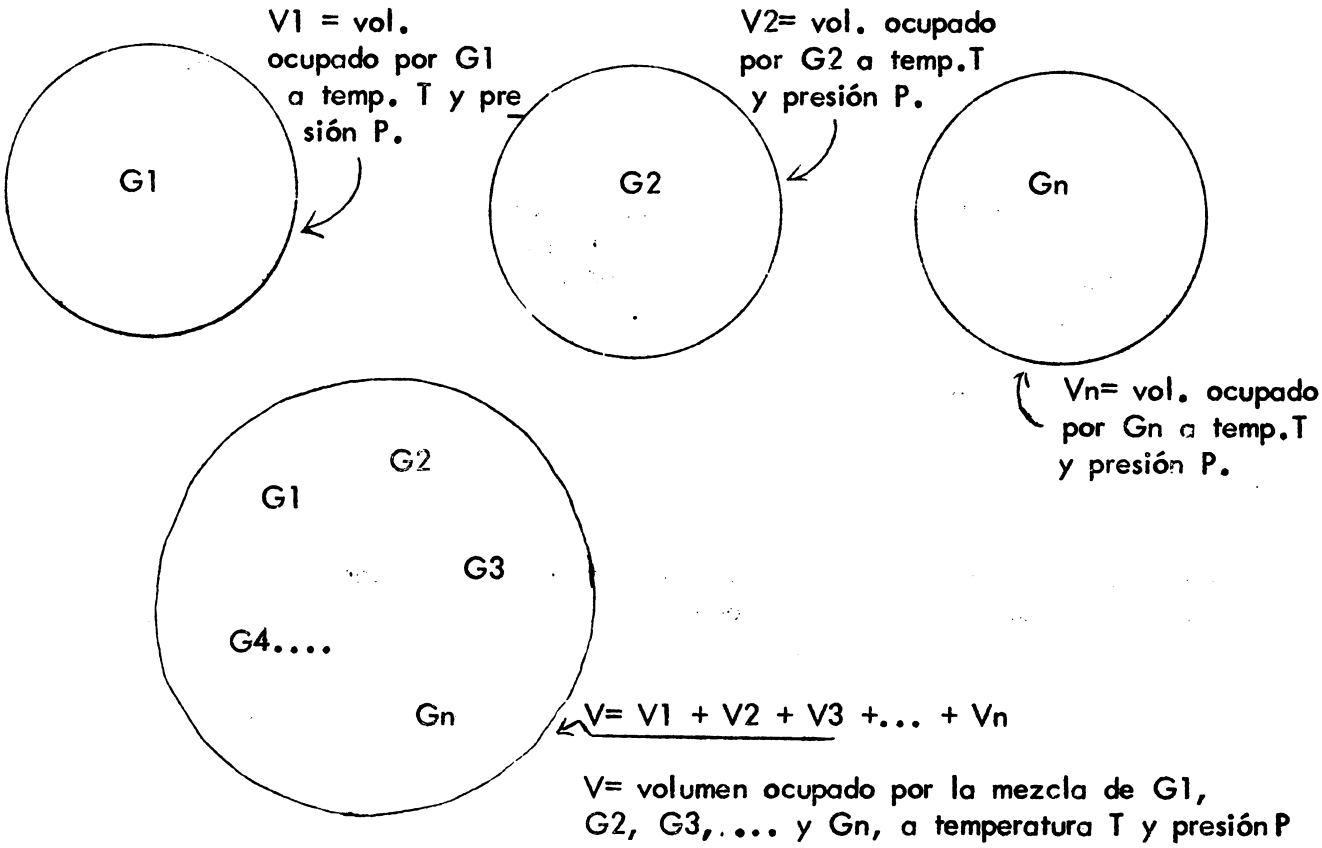


"... cada una de las masas de gases que conforman la mezcla, ejerce la misma presión que ejercería si se encontrara ocupando sola, a la misma temperatura de la mezcla, el mismo volumen de la mezcla total"(Figura 2).

Conocida la ley de Dalton referente a las presiones parciales, no existe dificultad alguna para entender lo que podría llamarse la segunda parte de esta ley, cuyo enunciado es: La presión total ejercida por una mezcla de gases perfectos, es igual a la suma de las presiones parciales ejercidas por las diferentes masas de gases que conforman la mezcla.

4. Ley de Amagat. El volumen de la mezcla como función de los volúmenes que la conforman. Enunciado: El volumen ocupado por una mezcla de gases es igual a la suma de los volúmenes ocupados separadamente por cada uno de los gases que conforman la mezcla, a la misma temperatura y presión de dicha mezcla.

Esta ley simplemente predice que si tenemos una masa dada G1 de un gas que ocupa un volumen V1 a una temperatura T y presión P, y otra masa dada G2 de otro gas que ocupa un volumen V2 a temperatura T y presión P, ..., y otra masa dada Gn de otro gas que ocupa un volumen Vn a una temperatura T y presión P, y mezclamos las masas G1, G2.,... y Gn, el volumen total ocupado por la mezcla a temperatura T y presión P, será igual a V= V1 + V2 + ... + Vn



5. La ecuación de los gases perfectos. Hasta el momento hemos estudiado las relaciones presión-volumen, temperatura-volumen, pero no conocemos aún alguna relación de presión-volumen-temperatura; sin embargo, resulta fácil obtener la relación deseada, en base a las leyes propuestas; basta con combinar las leyes de Charles y de Boyle, y tener en cuenta la hipótesis de Avogadro ("el número de moléculas de gas presentes en un volumen dado, a presión y temperatura dadas, es siempre constante sin importar el gas o los gases presentes en el volumen") para establecer la llamada ecuación de los gases perfectos:

$$P\,V = n\,R\,T \qquad (14)$$

donde:

P = presión (en atmósferas, 1 ats= 760 mm. de Hg) que ejerce el gas (o la mezcla de gases) en las condiciones dadas de temperatura y de volumen.

V = volumen (en centímetros cúbicos) ocupado por la masa dada de gas (o de mezcla de gases) en las condiciones de temperatura T y presión P.

n = número de moléculas de gas (o de moléculas "aparentes" de mezcla de gases) presentes en el volumen V con temperatura T y presión P.

T = temperatura absoluta (grados Kelvin = 273 + grados centígrados) del gas (o de la mezcla).

R = constante universal de los gases; dentro del conjunto de unidades que venimos utilizando su valor es : 82.06 ats.-cmt^3-grm.mol^{-1} K^{-1}.

Las unidades utilizadas en la ecuación de los gases perfectos dependen del sistema adoptado; en nuestro caso hemos utilizado el sistema métrico decimal. En cada caso la constante universal de los gases (R) tendrá un valor propio que depende del sistema unitario aplicado.

También se acostumbra a expresar la ecuación de los gases perfectos de la siguiente manera:

$$M\,P\,V = R\,T \qquad (15)$$

donde P, R y T conservan el significado anterior y sus unidades de medida, mientras que V y M adoptan la siguiente forma:

V= volumen específico del gas, o de la mezcla de gases (cmts.3/grm.); entendiéndose por volumen específico, el volumen ocupado por la unidad de masa.

M= peso molecular del gas (o peso molecular aparente de la mezcla de gases).

Obsérvese que de la expresión (14) se deduce inmediatamente la expresión (15), teniendo en cuenta que n (número de moléculas presentes), se puede hallar en base a M (peso molecular real o aparente, del gas o de la mezcla) y a m (masa de gas presente en la mezcla), así:

$$n = \frac{m}{M} \qquad (16)$$

(16) nos indica simplemente que para hallar el número de moléculas presentes (en el volumen dado), basta con dividir el peso total de gas (o de la mezcla) por el peso de una molécula del gas o de la mezcla. Entonces, reemplazando (16) en (14) tendremos:

$$P\,V = n\,R\,T = \frac{m}{M}\,RT \qquad (17)$$

por lo tanto:

$$M\,P\,\frac{V}{m} = RT \qquad (18),$$

y sabiendo que $\frac{V}{M}$ se conoce como un volumen específico y se simboliza simplemente como V en la expresión (15), se concluye:

$$M\,P\,V = RT \qquad (18)$$

Obsérvese claramente que V tiene dos significados diferentes: en (15) es volumen del gas o de la mezcla y se expresa en unidad de volumen solamente (cmts.^{3}, en este caso dado); en (16) es volumen específico del gas o de la mezcla y se expresa en unidades de volumen/masa (cmts.^{3}/gr., en este caso).

VI.12.74
mgm

IV. EL CONTENIDO DE HUMEDAD DEL GRANO

A. El Agua dentro del Grano

Se ha visto cómo la masa de grano es una mezcla de materia seca (carbonohidratos, almidones, etc.) y agua en forma líquida o de vapor.

"El agua se encuentra retenida en los granos en tres formas diferentes que son:

-Agua libre, que es la retenida en los espacios intergranulares

-Agua absorbida o de constitución física que es la retenida físicamente por las moléculas (carbohidratos y proteínas del grano)

-Agua de composición, o sea la que forma los carbohidratos, proteínas, etc., del grano". *

La masa de agua libre sumada a la masa de agua de constitución, forman la masa total de agua que se tiene en cuenta para cuantificar el contenido de humedad del grano. Obsérvese que la masa de agua de composición no se tiene en cuenta pues si ésta se extrajera se descompondría , lo que se ha llamado materia seca con lo cual los carbohidratos y las proteínas sufrirían trasformaciones químicas indeseables.

B. Cuantificación de la Humedad del Grano

El contenido de agua del grano se cuantifica en términos de porcentaje de humedad; este porcentaje se obtiene relacionando porcentualmente el peso del agua (agua libre + agua de constitución), con el peso total del grano húmedo (materia seca + agua):

$$\% \text{ Humedad} = \left(\frac{\text{Peso agua}}{\text{Peso agua + materia seca}} \right) \times 100 \qquad (19)$$

* Tomado de : Fitopatología en granos almacenados. Por José María Rodríguez, Curso para formación de Técnicos en Manejo de Plantas de Silos del IDEMA. Tomo 3.

$$\% \text{ Humedad} = \left(\frac{\text{Peso agua}}{\text{Peso del grano húmedo}} \right) \times 100 \qquad (20)$$

Al dato así calculado se le denomina porcentaje de humedad del grano en base húmeda, pues se ha relacionado el peso de la masa de agua con el peso total del grano húmedo. Obsérvese que en la fórmula anotada se entiende por peso de agua la suma de masas de agua libre y de constitución y que no se tiene en cuenta el agua de composición. De la misma forma obsérvese que por peso de grano húmedo se ha adoptado el peso de la materia seca más el peso total del agua.

Algunos autores prefieren cuantificar el contenido de agua del grano en términos de porcentaje de humedad en base seca; esto es, que prefieren relacionar porcentualmente el peso del agua (libre más constitución) respecto al peso de materia seca presente en la masa de grano:

$$\% \text{ Humedad} = \left(\frac{\text{Peso agua}}{\text{peso grano seco}} \right) \times 100 \qquad (21)$$

y al dato así obtenido lo denominan porcentaje de humedad en base seca.

Cualquiera de los dos sistemas de cuantificación de la humedad -en base seca ó en base húmeda- resulta útil dentro de los cálculos de secamiento que posteriormente se estudiará; el hacer uso de uno u otro método depende generalmente de las facilidades relativas que ofrezca para un cálculo en particular. Para efectos del presente trabajo se hará uso del porcentaje de humedad en base húmeda y en adelante se le denominará simplemente porcentaje de humedad.

Con el objeto de aclarar los conceptos se presentan los siguientes ejemplos:

Se tienen 250 gramos de maiz húmedo, conformado así: 200 gramos de materia seca y 50 gramos de agua (agua libre + agua de constitución). Se necesita calcular el porcentaje de humedad del grano: (a) en base húmeda y (b) en base seca.

a) $$\% \text{ de Humedad en base húmeda} = \left(\frac{\text{Peso agua}}{\text{peso grano húmedo}} \right) \times 100$$

$$\% \text{ Humedad en base húmeda} = \frac{50}{250} \times 100 = 20\%$$

Este resultado indica que dentro de 100 gramos de grano húmedo hay 20 gramos de agua (agua libre + agua de constitución) y 80 gramos de materia seca (que incluyen los carbohidratos, proteínas, etc., los cuales conllevan en sí mismos el agua de composición).

b) % de Humedad en base seca: $\left(\frac{\text{Peso agua}}{\text{peso materia seca}} \right) \times 100$

Si se tiene en cuenta que el peso del agua es de 50 gramos, se concluye que el de materia seca es de 200 gramos y por lo tanto:

$$\% \text{ Humedad en base seca} = \frac{50}{200} \times 100 = 25\%$$

Este resultado indica que por cada 100 gramos de materia seca hay adicionalmente 25 gramos de agua; o lo que es igual que en 125 gramos de grano húmedo hay 25 gramos de agua y 100 de materia seca.

C. Medición de la Humedad del Grano

1. Definición del problema. Desde el punto de vista de la conservación del grano, no es indispensable determinar exactamente su contenido real de agua; basta con establecer un nivel seguro de almacenamiento (esto es, determinar un parámetro de humedad que garantice conservación adecuada) y fijar condiciones para su medición; dicho de otra forma, si se sabe que el grano al almacenarse por un método concreto, está en condiciones de almacenamiento cuando tiene un porcentaje de humedad X (medido mediante el método concreto), no importa en realidad que el porcentaje X hallado corresponda exactamente a la realidad o no. Lo único que importa es saber que el grano una vez que ha alcanzado esas condiciones se conservará seguramente. Por ejemplo, si se ha demostrado que cuando el grano puede almacenarse acusa h= 20%, humedad media en un aparato X, desde el punto de vista de la conservación no es necesario averiguar si el grano realmente tiene entonces 20 unidades de peso de agua por cada 80 unidades de peso de materia seca; al almacenador solamente le importa secar su grano hasta el punto en el cual el aparato X le indique un porcentaje de 20% o menos de humedad, pues así estará seguro respecto al acondicionamiento de su producto para almacenamiento.

Exagerando un poco podría afirmarse que el almacenador se bastaría con un aparato -o un sistema cualquiera de medición- mediante el cual obtuviera alguna señal que le permitiera saber cuándo el grano ha alcanzado ya el contenido de humedad óptimo para almacenamiento.

Desde el punto de vista del control contable de la comercialización, las exigencias respecto a la determinación de porcentaje de humedad del grano aumentan; en este caso sí es necesario establecer el dato lo más exacto posible (en términos absolutos y no paramétricos) respecto a la realidad.

El contador necesita saber qué peso de agua y qué peso de materia seca conforman una masa de grano en un momento dado; sólo así podrá calcular las mermas por deshidratación.

De la confrontación de los dos puntos de vista analizados, se concluye que todo sistema que se use para determinar el contenido de humedad del grano, debe llenar por lo menos dos requisitos:

a. Para satisfacer las necesidades del almacenador es indispensable que permita establecer parámetros fijos para almacenamiento seguro, y medirlos.

b. Para solucionar los problemas del contador, debe garantizar resultados lo más exactos posibles frente a la realidad.

Se sobre entiende igualmente, que los resultados establecidos por un sistema de medición han de ser comparables de tal forma que una misma muestra al analizarse repetidamente, por un mismo sistema, ofrezca siempre el mismo resultado, y que las diferencias calculadas para diferentes muestras -mediante el mismo sistema de medición- correspondan fielmente a sus diferencias en contenido real de humedad.

Entonces se deduce la necesidad de fijar métodos patrones para la medición de la humedad. Estos métodos deben contemplar unas condiciones invariables de trabajo y permitir el establecimiento del parámetro de almacenamiento seguro.

Por ejemplo, si se decide medir la humedad mediante una estufa que calienta la masa de grano (con corrientes de aire que se llevan el vapor de agua desprendido por el grano) con el objeto de hallar la diferencia entre el peso de la muestra antes y después del proceso, se deben fijar condiciones constantes para la operación de tal forma que toda muestra se someta a un mismo tiempo de proceso y a una misma temperatura; estos factores asi controlados permitirán obtener siempre el mismo resultado con una misma muestra, y resultados diferentes, pero en todo caso comparables, para muestras con diferentes humedades. Resulta lógico suponer que las condiciones constantes de trabajo

(en el ejemplo dado, tiempo y temperatura del proceso), se establecen tratando de lograr un proceso capaz de analizar cualquier muestra cuya humedad se halla dentro de los rangos comunes de recibo, tratamiento y almacenamiento de granos, (en nuestro ejemplo, debe suponerse que el tiempo y la temperatura del proceso se han escogido de tal forma que permitan secar por completo cualquier muestra dentro de un rango debidamente escogido de humedad).

Ampliando un poco más el ejemplo si se decide determinar la humedad del arroz mediante la estufa, debe esperarse que la temperatura escogida (c) junto con el tiempo (T) del proceso, aseguren que toda muestra (no importa su contenido inicial de humedad) quede totalmente seca al final de la operación, pues sólo así se garantiza que el porcentaje de humedad establecido -que se calcula por diferencia de peso- es exacto; además el sistema propuesto debe fijar el porcentaje de humedad, -así calculado- para arroz que asegure su almacenamiento adecuado.

2. Bases para el establecimiento de un sistema de medición. De acuerdo a la forma como se ha decidido cuantificar la humedad del grano, resulta obvio que el método más directo para medirla consistiría en pesar una muestra húmeda de grano, secarla y pesarla de nuevo, a fin de establecer por diferencia el contenido de humedad. Este método tiene dos inconvenientes: en primer lugar, siempre queda la duda respecto a si el grano ha perdido la totalidad del agua durante el secado, o si aún conserva parte de ella; en segundo lugar, la operación generalmente requiere demasiado tiempo, lo que impide determinar el dato con la oportunidad deseada.

Respecto al primer problema, se ha tratado de solucionar de diferentes formas. Un sistema simple consiste en tomar una masa de grano húmedo que se pesa y se somete al proceso de secado durante un período X de tiempo, al cabo del cual nuevamente se pesa, determinándose por diferencia la masa de agua extraída en esta primera parte del proceso; entonces el grano se somete de nuevo al proceso manteniendo constantes las condiciones de la operación durante un segundo período X de tiempo, y se pesa a fin de determinar la masa de agua extraída en esta segunda parte del secado.

Si el proceso descrito se continúa efectuando, siempre pesando la muestra inicial y sometiéndola a períodos constantes de secado -manteniendo las condiciones del proceso sin variación- y determinando la masa de agua extraída en cada período de secado, se verá que la cantidad de agua extraída de grano, en el primer período X de tiempo, es menor que la extraída en el segundo período y que ésta a su vez puede ser menor que la extraída en el tercer período, lo cual nos permite concluir que durante la primera fase del secamiento, la cantidad de agua extraída aumenta rápidamente, en la medida que avanza el proceso. Esta tendencia continúa hasta el punto en el cual la cantidad de agua extraída en un mismo período de tiempo, tiende a permanecer

constante y -durante esta fase del proceso- debe esperarse una rata uniforme de extracción de agua; finalmente, se verá que la rata de extracción deja de ser constante y que la cantidad de agua extraída en cada período X de tiempo va disminuyendo hasta llegar a un punto en el cual la extracción de humedad es prácticamente nula.

Con el objeto de aclarar el concepto teórico, se ofrece el siguiente ejemplo en términos numéricos, pero se establece de antemano que los valores propuestos no corresponden exactamente a la realidad, sino que se han escogido arbitrariamente con el único fin de ilustrar al lector.

Supóngase una muestra inicial del grano que pesa 500 gramos y que se somete a una serie de períodos constantes de secamiento de X minutos, cada uno, con los siguientes resultados:

Período	Peso inicial gramos	Peso final gramos	Masa extraída gramos	Incremento extrac. gramos
1	500	495	5	
				5
2	495	485	10	
				5
3	485	470	15	
				0
4	470	455	15	
				0
5	455	440	15	
				-2
6	440	427	13	
				-3
7	427	417	10	
				-4
8	417	411	6	
				-5
9	411	410	1	

Obsérvese que durante el primer período se removieron 5 gramos de agua del grano (diferencia entre el peso inicial y peso final de la muestra), mientras que en el segundo período la extracción fue de 10 gramos y en el tercero de 15 gramos; esto permite observar que durante la primera fase del proceso (en este caso la primera fase se haya conformada por los tres primeros períodos del secado) la extracción ha ido aumentando progresivamente.

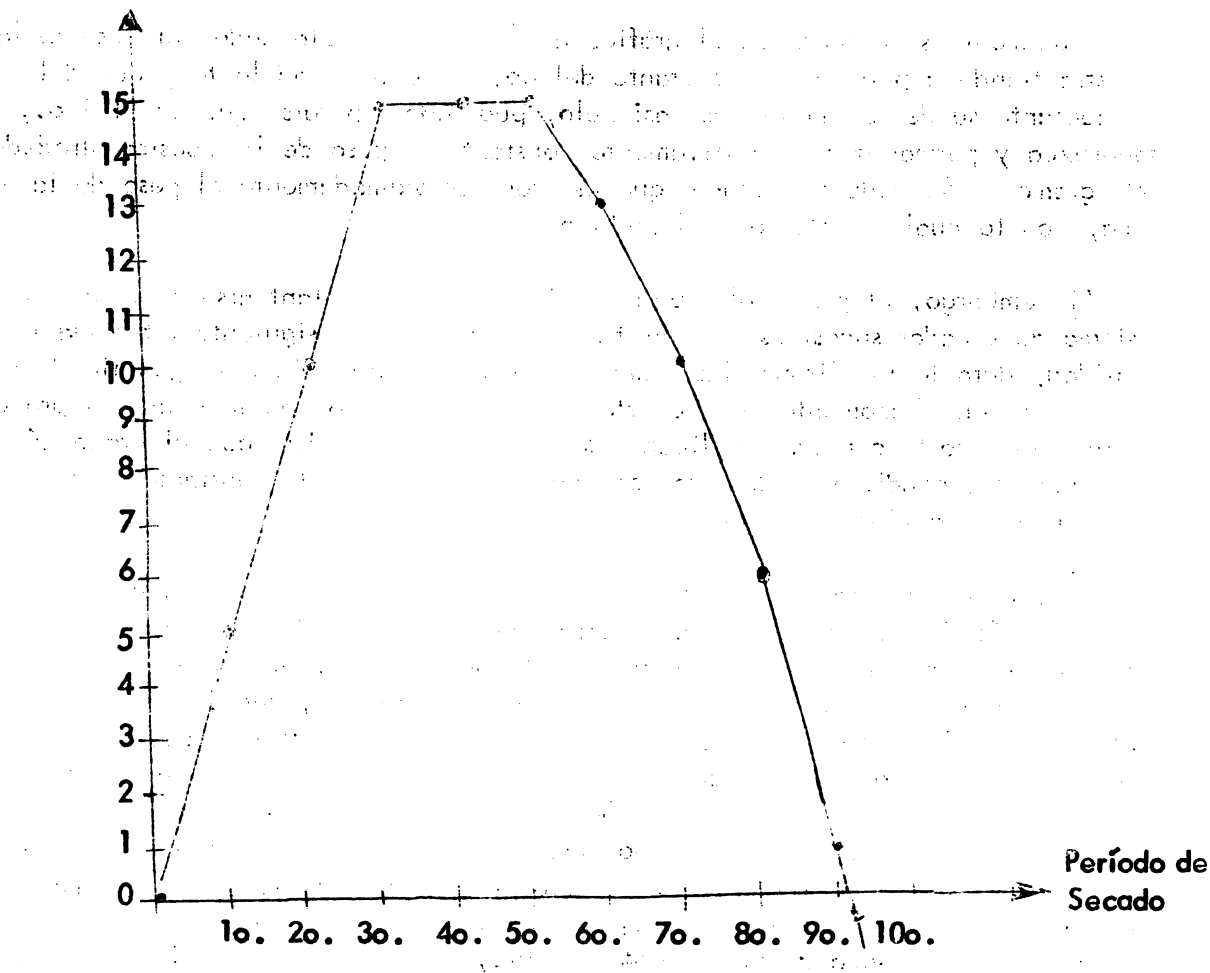
Obsérvese igualmente que durante el tercer período la extracción fue de 15 gramos y que esta extracción se mantuvo constante durante los períodos 4o. y 5o., esto permite concluir que durante esta segunda fase del proceso (desde el comienzo del tercer período y hasta la finalización del 5o.), la rata de extracción ha permanecido constante. Finalmente, se observa que a partir del 6o. período la remoción de agua empieza a disminuir en términos absolutos (así, mientras en el 6o. período fue de 13 gramos, en el 7o., fue de 10, en el 8o., fue de 6 y en el 9o. fue de 1); se concluye que durante la última fase del proceso (a partir del período 6o., de secado en este ejemplo), la rata de extracción de agua disminuye y tiende a anularse.

Si se supone que en el instante en el cual la extracción se anula, el grano se halla totalmente seco, es posible pesar la muestra y por diferencia respecto al peso de la muestra inicial determinar el contenido de humedad inicial, así:

$$\% \text{ de humedad} = \frac{\text{Peso de la muestra húmeda} - \text{peso muestra seca}}{\text{Peso de la muestra húmeda}} \times 100$$

Es claro que teóricamente surgen reparos al método propuesto: por ejemplo, resulta difícil y demorado alcanzar el punto en el cual se anula por completo la extracción; sin embargo, es factible obviar el asunto teniendo en cuenta que tan sólo con determinar la tendencia de decrecimiento de la extracción se puede predecir teóricamente el punto donde se anula la extracción y el peso probable de la muestra seca en ese momento. En el ejemplo anterior resulta lógico esperar que en el 10o., período de secado la extracción se anule; y para entonces la muestra seca pesará 409 gramos más o menos un gramo, esto se establece al observar que la extracción ha venido disminuyendo (13, 10, 6, 1) y que el incremento de extracción decrece rápidamente (0, -2, -3, -4, -5), datos estos, que analizados indican que la extracción en el período 10o, será inferior a un gramo, mientras que el incremento esperable matemáticamente será de -6, pero para lograr ese incremento se requiere que la extracción disminuya en 7 gramos, lo cual es imposible pues la última extracción fue de un gramo; se concluye entonces que en el 10o., período la extracción será inferior a un gramo y el grano quedará totalmente seco. Esta conclusión se confirma graficando los resultados del proceso, así:

Gráfico de Masa extraída en cada Período



Este gráfico resume el proceso total: en primer lugar, permite observar cómo inicialmente la extracción aumenta con el proceso, hasta un punto en el cual permanece constante para, luego, decrecer y tender a anularse; en segundo lugar, -con sólo unir los puntos dados- deja entrever que la extracción se anulará después de terminar el 9o. período y antes de que concluya el 10o.

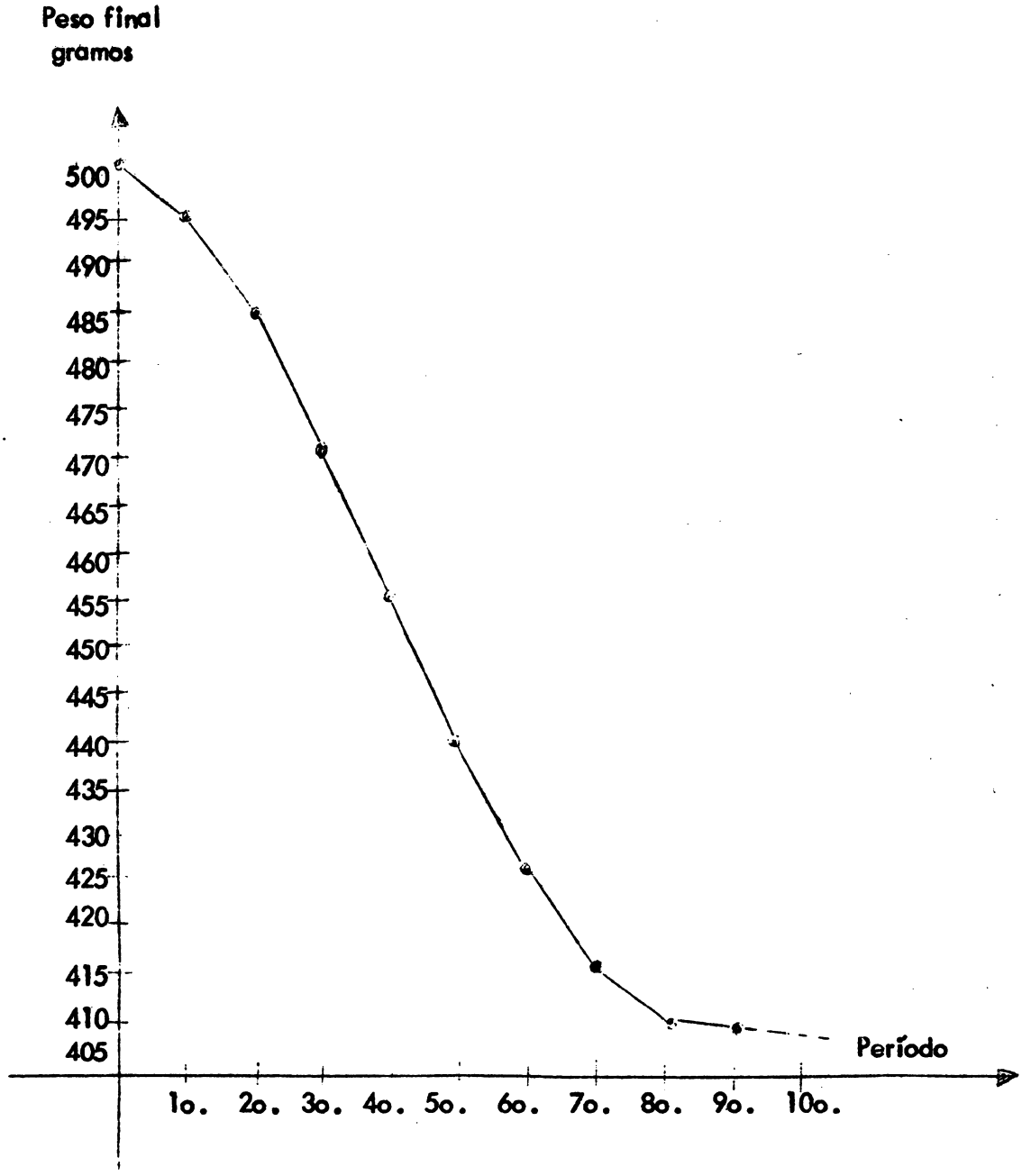
Este gráfico muestra cómo el peso de la muestra húmeda empieza a decrecer en la medida en que avanza el proceso; inicialmente decrece lentamente y posteriormente más rápido hasta llegar a un punto en el cual de nuevodecrece lentamente, tendencia que predomina luego hasta el momento en el que la muestra se ha secado por completo y en adelante el peso permanecerá constante pues -al menos en teoría- el secado habrá concluído totalmente.

Igualmente se observa en el gráfico que -en el ejemplo dado- el peso de la muestra tiende a permanecer constante del 8o. período en adelante y que del 9o. en adelante su decrecimiento es casi nulo, pudiendo esperarse que en el 10o., desaparezca y permanezca definitivamente constante el peso de la muestra alrededor de 409 gramos. Se deduce entonces que ese será aproximadamente el peso de la muestra seca, con lo cual se soluciona el problema.

Sin embargo, el principal reparo teórico que puede plantearse alrededor de este sistema de secados sucesivos, lo constituye la solución al siguiente interrogante: en realidad, durante las últimas fases del proceso, la extracción del agua tiende a anularse, pero en el momento en que esto sucede se debe solamente a que el grano está totalmente seco? o puede explicarse desde el punto de vista que el grano aún guarda agua pero las condiciones del proceso -que han permanecido constantes- no permiten una mayor extracción?

La solución al problema es más complicada y requiere de investigación previa; quizá el método experimental más sencillo consiste en repetir el proceso de secados consecutivos cambiando las condiciones de la operación, tratando cada vez de establecer condiciones de mayor eficiencia, y comparando los pesos de grano seco obtenidos en los diferentes intentos. Si se continúa con el ejemplo propuesto, se tiene que en las condiciones de secado utilizadas inicialmente el peso final resultante de grano seco (se supone que está seco) fue de 409 gramos; entonces con el objeto de determinar si ese grano contiene o no agua se propone someter estos 409 gramos a un nuevo proceso de secados consecutivos pero con nuevas condiciones de mayor eficiencia (por ejemplo, aumentando la temperatura del aire en el proceso, o aumentando la rata de aire, o desecando previamente el aire, etc.,) hasta determinar el peso final dentro del nuevo proceso; así siempre que la extracción se anule se cambiarán las condiciones del secamiento, buscando cada vez mayor eficiencia. Si esto se hace un

Gráfico de pesos finales para cada período



número de veces, se verá como llega un momento en el cual -auncuando las condiciones se mejoren más y más- la extracción se anula, para concluir que las condiciones utilizadas en el último caso son las más aconsejables y que permiten finalmente garantizar que el grano estará seco por completo.

Una vez establecidas hipotéticamente las condiciones ideales de operación en el sistema, se procede a verficarlas para granos con humedad diferente a la de la muestra original. Para este fin se preparan muestras del mismo grano analizado en principio y cuya enfermedad ya ha sido establecida: cada muestra se pesa y posteriormente se humedece; si las muestras se toman con el mismo peso (W_i) y se agrega a cada una de ellas una cantidad diferente de agua, al final se obtienen muestras con diferente contenido de humedad. Si se tiene en cuenta que para cada muestra se conoce su peso inicial y su contenido inicial de humedad (H_i, es el mismo de la muestra ya analizada) tan solo resta esperar que el agua agregada en cada caso sea absorbida por el grano (se aconseja reposar las muestras, con el agua ya agregada, en refrigeradores con el fin de dar un período de estabilización) para pesar de nuevo y establecer el peso final (W_f) de cada muestra humedecida, con lo cual se puede calcular su humedad final así:

$$\text{si} \quad WF = \frac{W_i\,(100 - H_i)}{(100 - HF)}$$

$$HF = \frac{100 - W_i\,(100 - H_i)}{WF}$$

Continuando con el ejemplo que se ha venido desarrollando, supóngase que después de someter la muestra de 409 gramos resultantes del primer proceso de secados consecutivos, a posteriores procesos similares pero con condiciones de mayor eficiencia se obtiene en último que el peso del grano ya totalmente seco es de 407 gramos; se deduce que el porcentaje de humedad de la muestra inicial era:

$$\% \; H = \frac{(500 - 407)}{500} \times 100$$

$$\% \; H = 18{,}6\%$$

Si del mismo grano utilizado inicialmente se toman 10 muestras de 100 gramos cada una, es correcto adoptar que el peso inicial (W_i) es de 100 gramos en cada caso, y que la humedad inicial (H_i) es de 18.6% (igual a la analizada); entonces si a cada

una de estas muestras se agrega una cantidad diferente de agua, y se somete a reposo para equilibrar la humedad, al final se tendrán 10 muestras con diferente humedad final. Supóngase que después del período de reposo del peso final de cada muestra (WF) se determina:

Muestra	W_i gramos	H_i %	Agua agregada cc. aprox.	Gramos WF (*)	% $HF = 100 - W_i (100-H_i) / WF$
1	100	18.6%	1	101.0	19.41%
2	100	18.6%	2	102.1	20.27%
3	100	18.6%	3	103.3	21.20%
4	100	18.6%	4	104.0	21.73%
5	100	18.6%	5	105.2	22,62%
6	100	18.6%	6	106.1	23.28%
7	100	18.6%	7	107.0	23.93%
8	100	18.6%	8	108.0	24,63%
9	100	18.6%	9	109.2	25.46%
10	100	18.6%	10	110.3	26.20%

* WF para cada muestra se obtiene simplemente pesando la muestra luego de humedecidas.

Ahora es fácil calcular el porcentaje de humedad alcanzado por cada una de las muestras humedecidas; en efecto, basta con aplicar la relación:

$$HF = \frac{100 - W_i (100 - H_i)}{WF}$$

lo cual es factible dado que se conoce para cada muestra su peso inicial (antes de agregar el agua, en este caso W_i es de 100 gramos), su humedad inicial (18,6 en este caso) y su peso final (luego de humedecida y reposada, WF).

Continuando con el ejemplo, en este punto se cuenta ya con:

a. Un sistema para determinar la humedad del grano.

b. Unas condiciones hipotéticamente ideales para operar el sistema en cuestión, y

c. Un número de muestras (10 en este caso) cuya humedad se ha calculado teóricamente.

Tan sólo resta determinar la humedad de cada una de las muestras, mediante el sistema propuesto para efectuar la medición, y comparar los resultados obtenidos con los resultados esperables teóricamente, y por diferencia fijar los márgenes de error para evaluar el sistema e introducir los ajustes correspondientes. Ciertamente (quizá se haya notado en esta exposición) los estudios y la implantación de sistemas para medir la humedad del grano no son fácilles; y si se presentan estas notas -por demás escasas de profundidad- se hace con el único fin de dar una idea aproximada de las dificultades existentes y de la necesidad de obviarlas.

3. Algunos sistemas comunmente usados para la medición de la humedad del grano. De acuerdo al principio teórico utilizado por cada uno de los diferentes sistemas, estos se han clasificado en dos grandes grupos:

a. De medida directa. Son aquellos sistemas que para determinar la humedad del grano utilizan el principio básico de deshidratación, calculando el porcentaje buscado mediante el peso del agua extraída que se halla -en unos casos- por medición inmediata -en otros- por diferencia de peso entre la muestra húmeda y la muestra seca.

1) Brown Duvel . Es el aparato más simple usado en la medición de la humedad de los granos. Dada su exactitud se la reconoce en la mayoría de los países del mundo como equipo oficial de patronamiento; por esta razón, se trascribe su descripción y las instrucciones de manejo.

"Descripción y normas de empleo del aparato Brown Duvel.

El aparato Brown Duvel permite determinar la humedad de los granos aplicando el método de destilación.

Descripción del aparato.

El aparato consiste en varias unidades y de un tanque de agua montado en la parte posterior, atravesado por los tubos condensadores que sirven de refrigerantes.

Cada unidad se halla forrada de amianto y consta de una resistencia colocada en la parte inferior para su calentamiento; de un soporte para la retorta y una tapa.

Accesorios.

-Retortas
-Tubos condensadores
-Tubos graduados (de 20-25 cc.de capacidad. Graduados al décimo de cc.) Termómetros (escala de 0 a 220°C. Graduados de grado en grado, sobre fondo blanco).
-Tapones de goma
-Aceite (aceite mineral. Indusmóvil 88).
-Medida para aceite
-Recipiente colector de aceite
-Embudo
-Balanza (sensibilidad - 0,5 g.)

Operaciones Previas.

1) Controlar la balanza. Pesar 100 gramos de cualquier cereal e introducirlos en la retorta.

2) Medir 150 cc. de aceite y volcarlo en la retorta.

3) Colocar el tapón portador del termómetro cuidando que el bulbo quede sumergido 4/5 partes de su longitud. Colocar la tapa de cierre de la unidad.

4) Colocar el tubo graduado en la salida del tubo condensador.

5) Verificar si los distintos accesorios están conectados correctamente.

6) Abrir la llave de entrada de agua al tanque de manera que se mantenga el nivel de salida. (De no existir corriente de agua y a los efectos de una correcta refrigeración, tener la precaución de renovarla cuando se note que no está fría).

7) Abrir la llave para encender la resistencia, dejando que la temperatura llegue hasta 160°C.

8) Mientras tanto preparar los elementos necesarios para efectuar el control del aparato o bien para las determinaciones diarias.

9) Cuando la temperatura ha llegado a 160°C cerrar la llave de la resistencia. Desconectar la retorta y volcar su contenido en el recipiente colector de aceite.

Control del Aparato

IMPORTANTE: Una vez instalado el aparato Brown Duvel y por lo menos cada 15 días o cuando los cambios de temperatura ambiente sean muy marcados o cuando se note cualquier alteración en las resistencias, es necesario realizar un control del aparato a fin de mantenerlo en condiciones de correcto uso.

10) Efectuar un calentamiento previo según lo indicado en los puntos 1 y 9.

11) Medir 450 cc. de aceite frío y sin usar y volcarlos en la retorta.

12) Colocar el tapón portador del termómetro cuidando que el borde superior del bulbo quede al ras con la superficie del aceite.

13) Colocar en la unidad la retorta y la tapa respectiva. Conectar la retorta con el tubo condensador.

14) Abrir la llave para encender la resistencia. El aparato estará en condiciones de ser usado cuando tarde 20 minutos en alcanzar los 175°C con una tolerancia en más o menos de 1 minuto.

15) En caso de tardar más o menos de los minutos indicados se debe regular el aparato en la forma siguiente:

Accionar el dispositivo que permite acercar o alejar la resistencia de la retorta; si no existe un dispositivo para la regulación se debe acercar o alejar la retorta de la resistencia mediante placas de amianto que se deben retirar o agregar sobre el soporte de la retorta. En caso de que esto no fuera suficiente, se debe acortar o cambiar la resistencia a los efectos de obtener un mayor o menor calor según los casos.

16) Una vez ajustado el aparato a las especificaciones del control se está en condiciones de iniciar las determinaciones de humedad. En las determinaciones de humedad el operador no tendrá que tomar bajo ningún concepto el tiempo que se tarda para alcanzar la temperatura indicada en la tabla adjunta. Solamente debe controlarse el tiempo durante el control del aparato.

Determinaciones de Humedad

17) Efectuar un calentamiento previo según lo indicado en los puntos 1 a 9 inclusive.

18) Mientras tanto, pesar la cantidad de granos a analizar según lo indicado en la tabla adjunta. Colocar en la retorta el material pesado utilizando el embudo. Esta operación debe realizarse sin pérdida de tiempo puesto que los granos alteran su humedad al ser expuestos al aire.

19) Medir la cantidad de aceite indicada en la tabla adjunta para el grano a analizar. Volcar el aceite medido en la retorta.

20) Colocar el tapón portador del termómetro, cuidando que el bulbo quede sumergido 4/5 partes de su longitud.

21) Colocar en la unidad la retorta y la tapa respectiva. Conectar la retorta con el tubo condensador.

22) Colocar el tubo graduado en la salida del tubo condensador en forma tal que el extremo inferior de éste quede un poco introducido en el tubo graduado.

23) Comprobar si los distintos accesorios están conectados correctamente.

24) Abrir la llave para encender la resistencia. Dejar que la temperatura llegue al límite indicado para el grano a analizar.

25) Cerrar la llave de la resistencia cuando se llega a la temperatura indicada para el grano a analizar. Dejar descender la temperatura a 160°C.

26) Retirar el tubo graduado y hacer la lectura debajo de la capa de aceite. En caso de que ésta se presente en forma irregular tomar como lectura el nivel medio.

27) Las determinaciones deben efectuarse por lo menos, por duplicado. El resultado será el promedio de las lecturas realizadas por cada análisis. Debe repetirse todo ensayo que entre duplicados presente una diferencia mayor de 0,4 cc. (Tolerancia de análisis más o menos 0,2 con respecto a la lectura promedio).

Recomendaciones

28) Las muestras a analizar deben conservarse en envases herméticamente cerrados a fin de que no alteren su humedad al ser expuestos al aire.

29) Se debe cuidar que no haya agua en los tubos graduados. Estos se deben limpiar y secar cuidadosamente antes de empezar cada análisis.

30) No se debe emplear en las determinaciones aceite caliente.

31) Se recomienda emplear sólo de 2 a 3 veces aceite usado, frío, puesto que siempre éste retiene algo del agua de las determinaciones anteriores.

32) En el caso del calentamiento previo indicado en los puntos 1 al 9 inclusive, puede emplearse el aceite y grano utilizado en la última determinación del día anterior. Este calentamiento previo debe efectuarse a los efectos de uniformar la temperatura de la primera determinación con las siguientes.

33) Ajustar debidamente los tapones de goma a los efectos de evitar pérdidas de vapor.

34) En caso de tener duda sobre los resultados obtenidos con el aparato que se dispone, se recomienda remitir a la Gerencia Técnica, en envase hermético, 500 gramos de una muestra analizada, consignando el resultado logrado y sus parciales.

35) El aparato se debe instalar en un lugar resguardado de corrientes de aire.

36) Conectar el tanque de agua, el tubo de entrada ubicado en la parte inferior y el tubo de rebalse colocado en la parte superior.

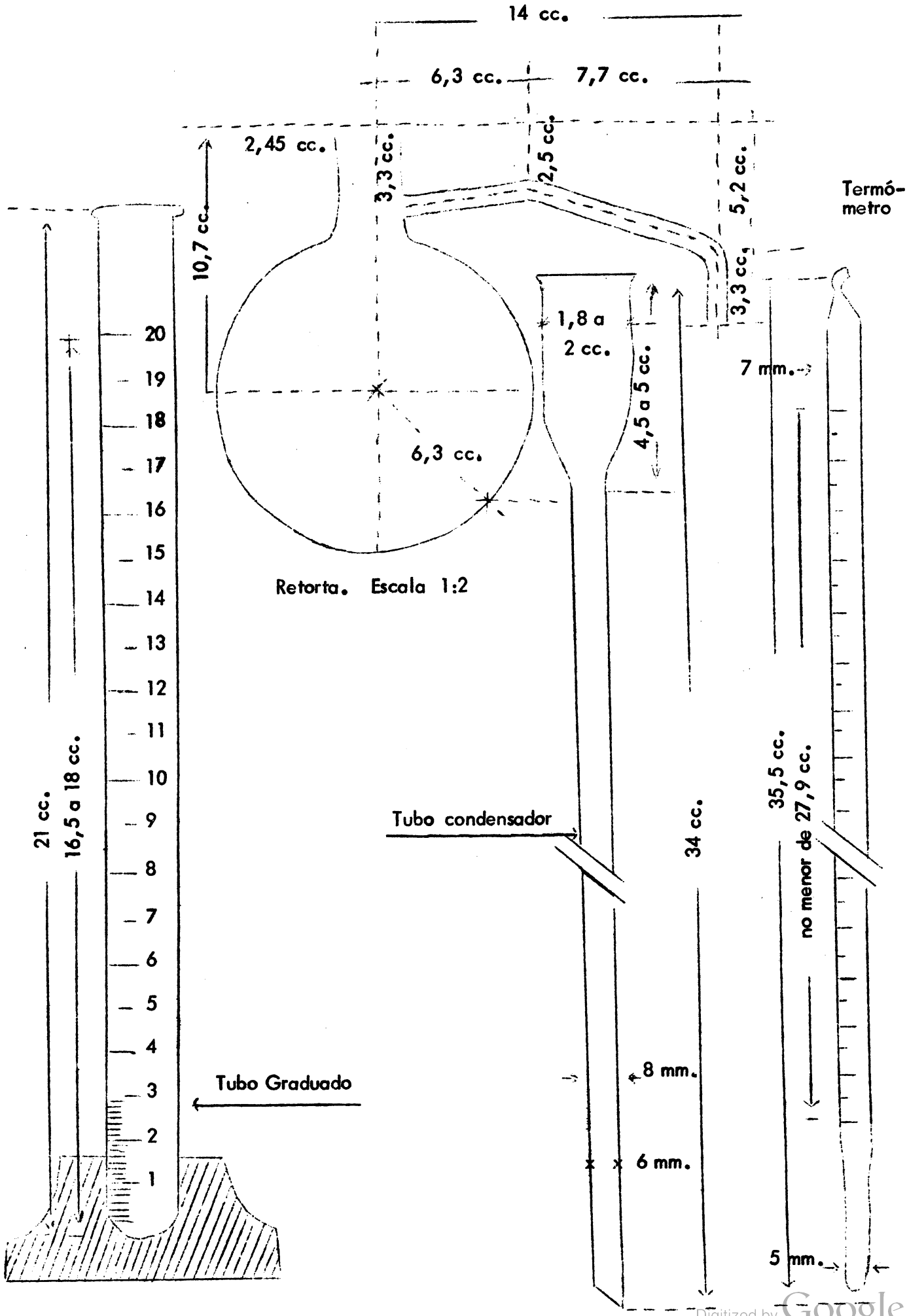
Cuadro con Especificaciones para la Determinación de Humedad por el Aparato Brown Duvel

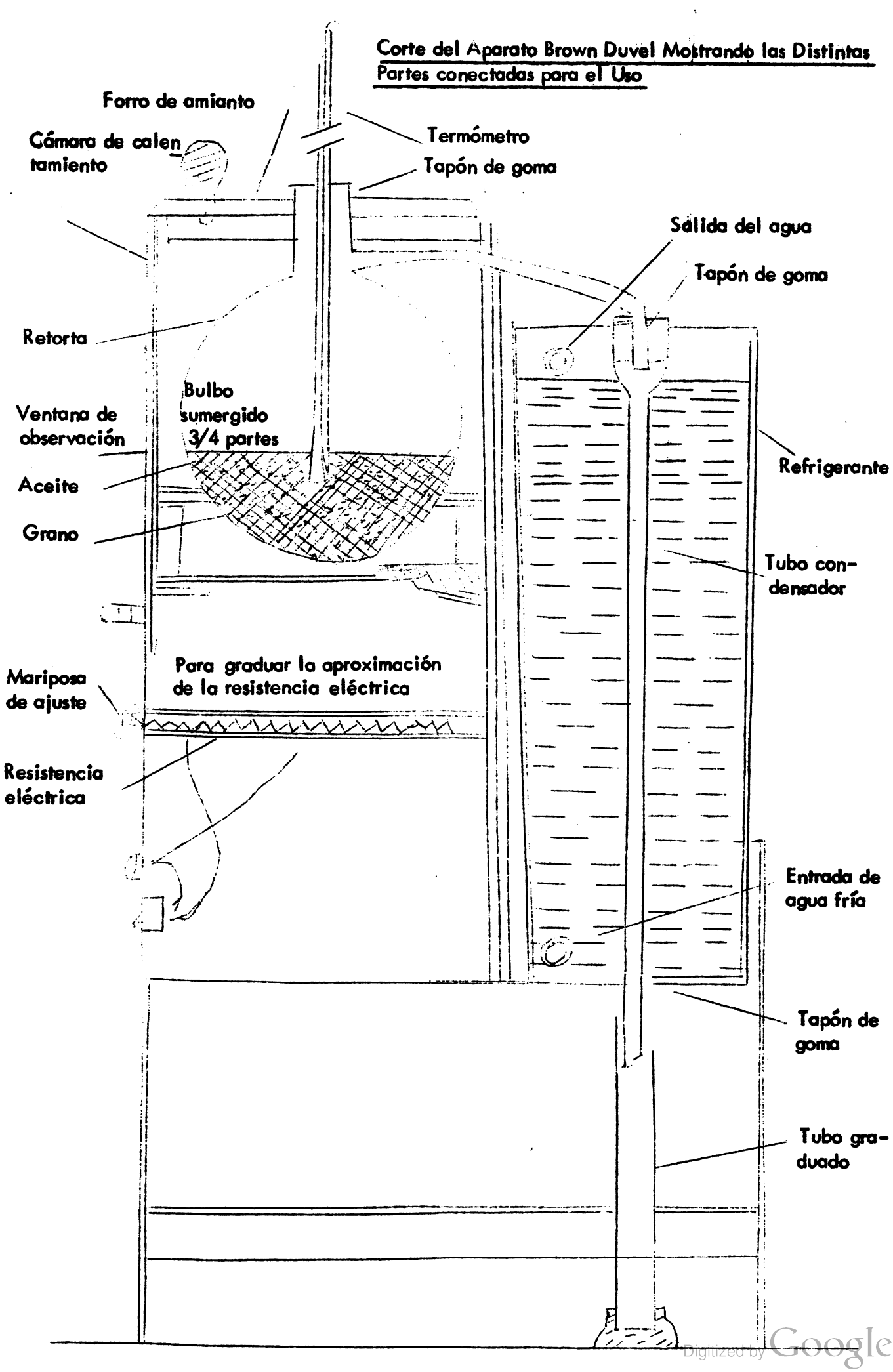
GRANO	Cantidad grano. Gr.	Aceite cc.	Temperatura de Corte. Grados C.
Arroz	100	150	210
Avena (x) (1)	50	150	195
Cebada	100	150	190
Centeno	100	150	185
Girasol	100	200	182
Girasol (muy húmedo) (x)	50	200	193
Maíz (2)	100	150	190
Maíz (espiga) (x) (2)	50	250	190
Maní (descascarado)	100	150	175
Sorgo	100	150	195
Trigo	100	150	195

(x) Las lecturas logradas en estas determinaciones deben multiplicarse por 2, a los efectos de referir los resultados a 100 gramos de muestra.

(1) Si se produce mucha espuma, agregar 50 cc. de aceite.

(2) Excepto para maiz dulce.





2) Estufas. La determinación del porcentaje de humedad en este tipo de aparatos se lleva a cabo mediante la diferencia de peso existente entre la muestra húmeda y la muestra seca.

A grandes rasgos, el procedimiento normal a seguir, es el siguiente: Se toma una porción representativa (generalmente 5 gramos) de la muestra que se desea analizar, se muele y se pesa con la mayor exactitud posible; posteriormente, se introduce en una cápsula y se coloca en la cámara de la estufa donde permanece un período de tiempo fijado, (generalmente una hora), a una temperatura determinada de antemano. Terminado el proceso la muestra seca se pesa y por diferencia con la muestra inicial se establece el peso del agua removida en la operación.

El uso de estos equipos se halla ampliamente difundido, especialmente dentro de los laboratorios de análisis de semillas; igualmente resulta frecuente su utilización en los laboratorios de análisis de suelos.

La exactitud de este sistema depende fundamentalmente del grado de aproximación que se alcanza en la báscula o balanza pesamuestras; es conveniente hacer notar que dado el reducido del tamaño de la muestra cualquier error en su pesada resulta importante, aún cuando en términos absolutos no lo parezca. Una ventaja de este sistema consiste en que resulta muy fácil efectuar simultáneamente la operación con un número dado de muestras análogas, lo cual permite comparar los diversos resultados, su desviación y su posible margen de error.

b. De medida indirecta. En general, estos sistemas utilizan propiedades físicas del grano, las cuales correlacionan a diferentes niveles de humedad. Dentro de dichas propiedades, se explotan con mayor frecuencia las eléctricas.

1) Sistemas de resistencia. Parten del principio que todo cuerpo ofrece una resistencia determinada al paso de la corriente eléctrica; y que esa resistencia en el caso específico de los granos, varía con la humedad. Así, granos con mayor humedad opondrán una menor resistencia al paso de la corriente, que granos con humedades muy bajas; esto ha permitido que para cada grano -en particular- se elaboren tablas que correlacionan la humedad en un momento dado, con la resistencia que oponen al paso de una corriente eléctrica

determinada, en ese mismo momento. Vale la pena destacar que los principales factores de error, radican en el tamaño de la muestra (pesajes erróneos) y en la fuente de corriente que presenta fluctuaciones en algunos casos; la temperatura de la muestra a la cual se le toma la humedad es definitiva y conlleva necesariamente a establecer factores de corrección por este concepto, pues también la resistencia que opone un cuerpo al paso de la corriente varía con la temperatura de dicho cuerpo.

2) Sistemas de Constante Dieléctrica. La Constante Dieléctrica es una propiedad física de los cuerpos similar en cierto modo a la resistencia. Análogamente cada sustancia tiene una constante dieléctrica particular. Es de esperarse pues que cada grano tenga su propia constante dieléctrica, solo que dicha constante varía -dentro de un rango establecido para cada grano- de acuerdo a su humedad.

En base a las diferencias anotadas se ha tabulado la constante dieléctrica de las diversas clases de grano a diferentes niveles de contenido de humedad; el sistema consiste entonces en determinar cuál es la constante dieléctrica del grano en un momento dado y buscar en la tabla el porcentaje de humedad correlativo.

La exactitud de la medición depende fundamentalmente del correcto pesaje de la muestra a analizar y del máximo control posible que se logre de la fluctuación de corriente. La temperatura constituye factor importante de corrección pues en la medida en que ella varíe debe esperarse cambio en la constante dieléctrica de los cuerpos.

NOTA: Una explicación más amplia de los diferentes sistemas y aparatos para la medición de la humedad de los granos, se encuentra en el libro de Carl W. Hall "Drying Farm Crops", Capítulo IV.

VI.14.74
mgm

V. EL CONTENIDO DE HUMEDAD DEL AIRE

Se ha convenido en secar la masa de grano mediante corrientes de aire que la atraviesen y remuevan su exceso de agua. Para adentrase en el estudio de los principios que rigen este tipo de secado, es indispensable conocer en detalle las características del aire que se usará en el proceso.

A. El Aire Seco y el Aire Ambiente

1. Composición. Para la mayoría de los efectos prácticos el aire ambiente se considera una mezcla de aire seco, vapor de agua e impurezas.

Por su parte, el aire seco en sí mismo es una mezcla de gases, conformada así:

Componente	% de Volumen	% de Peso
Nitrógeno	78.09	75.52
Oxígeno	20.95	23.15
Argon	0.93	1.28
Diox. de carbono	0.03	0.04
Otros (neón, hidrógeno, helio, etc.)		

Esta composición es representativa del aire exterior seco normal. La composición del aire seco confinado depende de las condiciones mismas de confinamiento, de las actividades que se desarrollen en el lugar de confinamiento y de su ventilación relativa.

En el aire ambiente, mezcla de aire seco normal y vapor de agua, la composición del aire seco permanece relativamente constante, pero la cantidad de vapor de agua que lo acompaña puede variar considerablemente de un caso a otro. Dicha cantidad de vapor de agua se expresa comunmente en relación con la unidad de peso del aire seco que la contiene; así es frecuente hablar del peso del vapor de agua por unidad de peso del aire seco (por ejemplo, kilogramos de vapor de agua por cada kilogramo de aire seco) y al contenido de vapor de agua así expresado se le denomina humedad absoluta del aire dado.

2. Propiedades físicas del aire seco normal. Se conoce por aire seco normal, el aire cuya densidad es 0.12 kgr/m3, (este es sustancialmente el mismo cuya composición porcentual se detalló antes) cuando se halla sometido a una presión barométrica de 760 milímetros de mercurio y a una temperatura de 22 grados centígrados. La temperatura y la presión barométrica del aire seco normal varían un poco con las condiciones del tiempo atmosférico y con la localización geográfica, y -notablemente- con la altura sobre el nivel del mar. Si se asume que el aire a nivel del mar tiene una temperatura de 15 grados centígrados y ejerce una presión barométrica de 760 milímetros de mercurio, es posible tabular sus propiedades físicas a diferentes altitudes, tal como se presentan en la siguiente tabla. (Presión barométrica b, densidad d, viscosidad absoluta u, viscosidad cinemática v, velocidad del sonido c, temperatura t, altitud Z).

3. Peso molecular del aire seco normal. El aire no es un gas, sino una mezcla mecánica de gases; por esto el aire no dispone de un peso molecular propiamente tal, sino de un peso molecular aparente.

El cómputo del peso molecular aparente del aire se puede efectuar a partir del análisis de su conformación porcentual por peso, o en base a su composición porcentual por volumen; el resultado es completamente igual, según se puede observar a continuación:

a. Cómputo del peso molecular aparente del aire seco a partir de su composición porcentual por peso.

Componente	% de peso	Composición por unidad de peso	Peso Mol.		Libras/mol.
Nitrógeno	75.52	0.7552	x 28.016	=	0.02696
Oxígeno	23.15	0.2315	x 32.000	=	0.00723
Argon	1.28	0.0128	x 39.944	=	0.00032
C-O2	0.04	0.0004	x 44.010	=	0.00001
	100.00%	0.9999			0.03452

Peso Mol. Aparente = 0.9999/0.03452 = 28.966 libras por mol.

b. Cómputo del peso molecular aparente del aire seco a partir de su composición porcentual por volumen.

Componente	% de volumen	Composición por unidad de vol.	Peso Mol.		Libras/Mol.
Nitrógeno	78.09	0.7809	x 28.016	=	21.878
Oxígeno	20.95	0.2095	x 32.000	=	6.704
Argon	0.93	0.0093	x 39.944	=	0.371
C-O2	0.03	0.003	x 44.010	=	0.130
	100.0 %	1.000			28.966

Peso Mol. Aparente = 28.966/1.0000 = 28.966 libras por mol.

B. La Humedad del Aire Ambiente. Ambiente - Definiciones y Cuantificación

En estos apuntes se definió el aire seco normal como una mezcla de gases; igualmente se definió el aire ambiente como una mezcla de aire seco normal, vapor de agua e impurezas. En adelante, en desarrollo del presente estudio, el aire seco normal se denominará solamente aire, mientras la mezcla de vapor de agua y aire seco normal se denominará aire húmedo; además se supondrá el aire ambiente libre de impurezas y conformado solamente por aire húmedo, lo cual da facilidad para el análisis de los procesos con aire ambiente que se revisan posteriormente.

Hechas estas aclaraciones, centramos nuestra atención en los términos y métodos utilizados comunmente para definir, cuantificar y medir la humedad del aire ambiente.

1. Humedad absoluta. Supóngase una masa m de aire ambiente, conformada por una masa m_a de aire seco y una masa m_w de vapor de agua ($m = m_a + m_w$); se define como humedad absoluta de la masa m, la masa de vapor de agua presente por unidad de masa de aire seco ($HA = m_w/m_a$). Así en el sistema decimal la humedad absoluta de un aire húmedo (o aire ambiente) se expresará en kilogramos de vapor de agua por kilogramo de aire seco (Kgr. V.A./Kgr. A.S.) o en gramos de vapor de agua por gramo de aire seco (Grs. V.A./Grs. A.S.) etc., mientras en el sistema americano se expresará en libras de vapor de agua por libras de aire seco, o en gramos de vapor de agua por libras (o por gramos) de aire seco.

2. **Humedad de saturación del aire.** Si a una masa dada de aire seco, que ocupa un volumen determinado en condiciones establecidas de temperatura, se le agrega una masa conocida de vapor de agua, resulta entonces una mezcla de aire seco y vapor de agua; la humedad absoluta de la masa de aire húmedo resultante se hallará dividiendo la masa de vapor de agua presente en la mezcla entre la masa de aire seco que la contiene. De otra parte, la presión ejercida por el vapor de agua dentro de la mezcla se puede establecer por diferencia entre la presión que ejercía el aire seco cuando se hallaba solo y la que ejerce en total la mezcla.

Si, manteniendo las condiciones de temperatura y volumen constantes, se continúa agregando vapor de agua a la masa de aire seco, la humedad absoluta de la mezcla -al igual que la presión ejercida por el vapor de agua dentro de ella- irá aumentando en la misma medida, hasta llegar a un punto en el cual la mezcla no soporta más vapor de agua y de agregársele más, éste se condensará.

Se define entonces como humedad de saturación de un aire dado, la máxima cantidad de masa de vapor de agua que puede contener por unidad de masa de aire seco. Obsérvese que la humedad de saturación es la humedad máxima que puede alcanzar el aire (en unas condiciones dadas).

3. Presión de saturación del vapor de agua en el aire. Se define como presión del vapor de agua de saturación en un aire dado, la presión ejercida por el vapor de agua en ese aire cuanto se satura.

Tanto la humedad de saturación del aire (como la presión de saturación del vapor de agua) varía en relación directa a la temperatura de la mezcla; a mayor temperatura un aire puede contener mayor cantidad de masa de vapor de agua sin saturarse.

4. Humedad relativa del aire. Se ha visto como el vapor de agua presente en el aire ambiente ejerce una presión (presión de vapor de agua en el aire) de acuerdo a la Humedad Absoluta de ese aire y a su temperatura.

Igualmente se ha definido la presión de saturación del vapor de agua en el aire.

La relación porcentual entre la presión que ejerce el vapor de agua contenido en el aire en un momento dado, y la presión máxima que podría ejercer el vapor de agua en el aire a la misma temperatura (presión de saturación del vapor de agua en el aire) se denomina Humedad Relativa:

$$\text{Humedad Relativa del Aire en un momento dado} = \frac{\text{Presión del V.A. Presente en el aire en ese momento}}{\text{Presión de saturación del V.A. a esa temperatura}} \times 100$$

Figura 1
Aire Seco

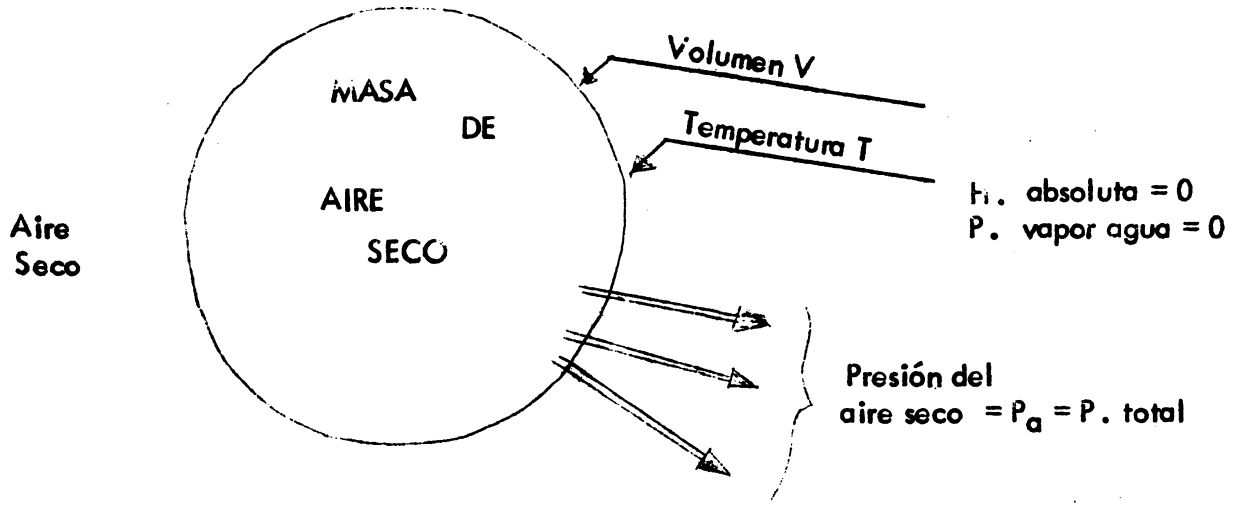


Figura 2
Aire Húmedo

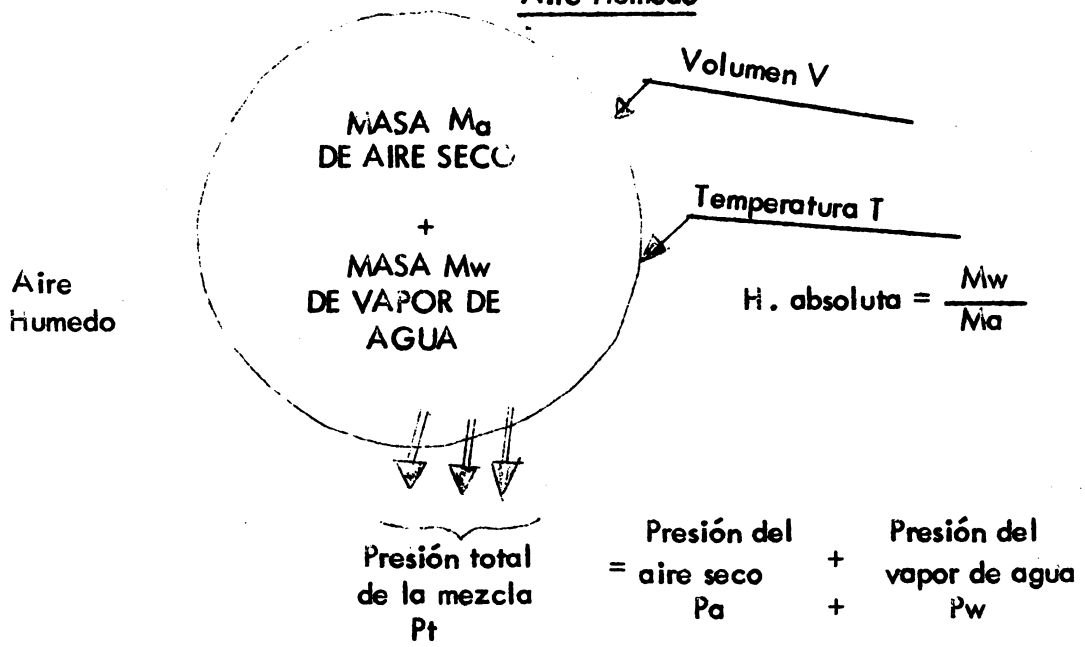
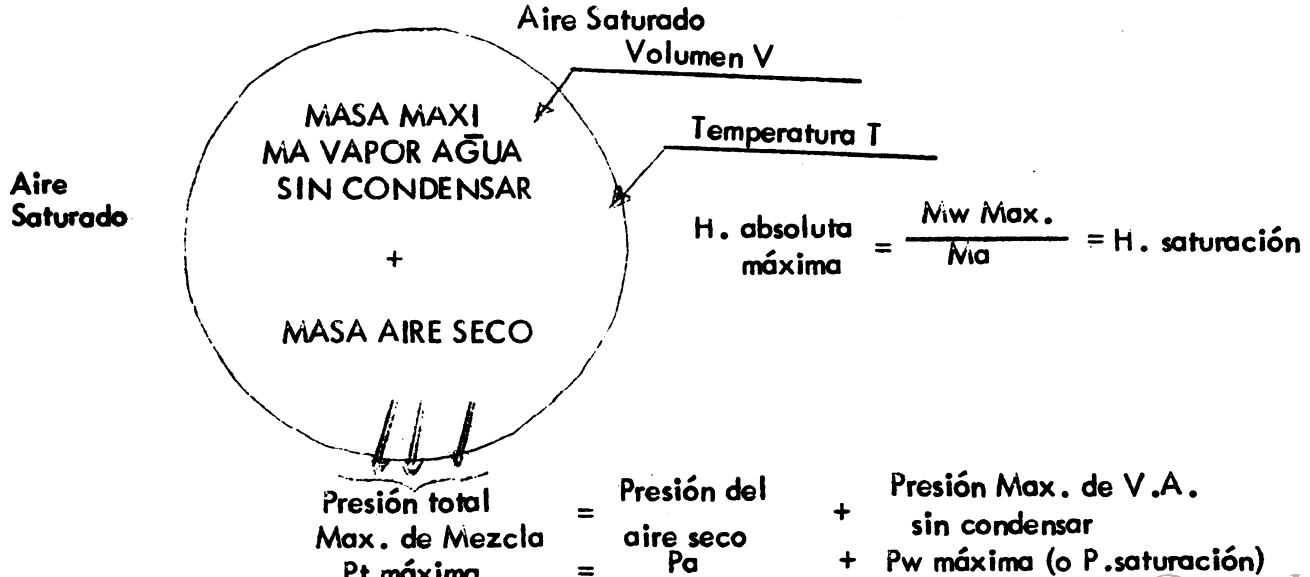


Figura 3
Aire Saturado



Ejemplo No. 1

Supóngase que se tiene 1 kgr. A. S. (un kilogramo de aire seco), a una temperatura de 20 grados centígrados, a 1 atsmósfera de presión y ocupando un metro cúbico de volumen. Cuál es la humedad absoluta del aire dado?

Si se tiene en cuenta que humedad absoluta es la masa de vapor de agua contenida por cada unidad de masa de aire seco.

$$\text{Humedad absoluta} = \frac{\text{Masa de vapor de agua}}{\text{Masa de aire seco}}$$

y que en este caso no existe masa alguna de vapor de agua (masa de vapor de agua = 0), se concluye que la humedad absoluta es

$$\text{H.A.} = \frac{0}{1} = 0 \text{ kilogramos de vapor de agua/kgr. A.S.}$$

o lo que es lo mismo que hay cero unidades de masa de vapor de agua por kilogramo de aire seco; si la humedad absoluta es cero, se deduce que el aire es totalmente seco.

Ejemplo No. 2

Supóngase que se tiene 1 kgr. A. S., a 20°C, 1 atsmófera y ocupando un metro cúbico. Cuáles la presión ejercida por el vapor de agua dentro de este aire? Naturalmente al estar el aire completamente seco, no contiene vapor de agua (ejemplo 1) y por lo tanto la presión ejercida por el vapor de agua no existe. Presión del vapor de agua es cero.

Ejemplo No. 3

Supóngase que se tiene 1 kgr. A. S., a 20°C, 1 atsmósfera de presión y ocupando un metro cúbico. Supóngase que ahora se introducen y se mezclan con el kilogramo de aire seco 20 gramos de vapor de agua; adóptese que el volumen continúa siendo un metro cúbico, la temperatura 20°C y la presión 1, 2 atmósfera.

a. Cuál es la humedad absoluta de la nueva mezcla de aire y vapor de agua?

La masa de agua es de 20 gramos de vapor

La masa de aire seco es un kilogramo

Por lo tanto la humedad absoluta

$$\text{H.A.} = \frac{\text{Masa vapor de agua}}{\text{Masa de aire seco}} = \frac{20 \text{ gramos}}{1 \text{ kgr.}} = 20 \text{ grs. vapor agua/kgr. A.S.}$$

b. Cuál es la presión ejercida por el vapor de agua dentro de la mezcla? Si se tiene en cuenta que la presión ejercida por el aire seco, en las condiciones dadas de temperatura y volumen era de una atmósfera, y que la presión ejercida por el aire húmedo en las mismas condiciones de volumen y de temperatura es ahora de 1, 2 atsmósferas, se concluye que la presión ejercida por el vapor de agua agregado es de 0,2 atsmósferas (por presión ejercida por Dalton, la presión total es igual a la suma de las presiones parciales).

Ejemplo No.4

Supóngase que se tiene incialmente 1 kgr.A.S., a 20°C, 1 atsmósfera y ocupando un metro cúbico. Adóptese que, manteniendo constante el volumen y la temperatura, agregamos a este aire seco masas sucesivas de vapor de agua, hasta llegar a un momento en el cual, si se agrega una mínima cantidad de vapor de agua, éste se condensa. Si la masa máxima de vapor de agua que soportó la mezcla sin condensarse el vapor de agua fue de 50 gramos y en ese momento la presión de la mezcla era de 1,5 atmósferas, calcular:

a. La humedad de saturación del aire con 20°C

Humedad de saturación es la máxima humedad absoluta que soporta un aire sin que se condense el vapor de agua contenido:

$$H.A.max. = \frac{\text{Masa max. de vapor de agua sin condensarse}}{\text{Masa de aire seco}}$$

$$H.A.max. = \frac{\text{50 grs. de vapor de agua}}{\text{1 kilogramo aire seco}} = 50 \text{ grs. V.A./1 kgr.A.S.}$$

Por lo tanto la humedad de saturación de un aire en las condiciones dadas, es de 50 gramos de vapor de agua por cada kilogramo de aire seco presente en la mezcla.

b. La presión de saturación del vapor de agua a 20 grados centígrados.

La presión total, a saturación, de la mezcla de aire y vapor de agua es de 1,5 atsmósferas y se sabe que la presión parcial ejercida por el aire seco en la mezcla es de 1,0 atsmósferas (presión aire seco) por lo tanto es factible hallar la presión ejercida por el vapor de agua a saturación por diferencia

Presión de vapor de agua a saturación = Presión total de la mezcla saturada = Presión del aire seco en la mezcla

" = 1,5 ats. - 1,0 ats. = 0,5 ats.

Ejemplo No.5

Suponiendo que se parte de un kilogramo de aire seco, a 20 grados centígrados, una atsmósfera y ocupando un metro cúbico, y que cuando se agrega a este aire seco 20 gramos de vapor de agua -manteniendo constante el volumen y la temperatura de la mezcla- la presión total de la mezcla es de 1,2 atsmósferas, calcule cuál es la humedad relativa de esta mezcla, si se sabe que la presión de saturación del vapor de agua en las condiciones dadas es de 0,5 atsmósferas. (ejemplo 4-b).

Se sabe que humedad relativa es la relación porcentual existente entre la presión del vapor de agua en el aire en un momento dado, y la presión de saturación del vapor de agua a la misma temperatura:

$$HR = \frac{\text{Presión del V.A.}}{\text{Presión del V.A. a saturación}} \times 100$$

Se sabe que la presión de saturación es de 0,5 atsmósferas.

Se sabe que la presión del aire seco es de una atsmósfera y que la presión cuando la H.A. es de 20 gramos por K.A.S. es de 1,2 atsmósferas; se concluye que la presión del vapor de agua cuando la HA es de 20 gramos V.A./K.A.S es de 0,2 atsmósferas (1,2 - 1,0 = 0,2)

luego:

$$HR = \frac{0,2}{0,5} \times 100 = 40\%$$