

OPTIMIZACIÓN DE LA TORREFACCIÓN DE MEZCLAS DE CAFÉ SANO Y BROCADO, EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA DE PROCESO Y EL AGUA DE APAGADO

José Jaime Castaño-Castrillón*; Gloria Patricia Quintero-Sánchez**

RESUMEN

CASTAÑO C., J.; QUINTERO S., G.P. Optimización de la torrefacción de mezclas de café sano y brocado, en función de la temperatura de proceso y el agua de apagado. Cenicafé 52(1):49-73. 2001.

Se optimizaron las variables principales de torrefacción, temperatura de torrefacción y cantidad de agua de apagado para tres mezclas de café almendra: café sano tipo consumo, café brocado 100% Grado 1, y una mezcla entre café sano y cafés brocados Grados 1 y 2. Se empleó un diseño experimental de superficies de respuesta. Se encontraron para las tres mezclas superficies de respuesta significativas para la impresión global (prueba de taza) y para otras variables complementarias. No se encontraron diferencias entre los valores óptimos de impresión global para las tres mezclas, aunque hubo diferencias con relación al tipo de dependencia exhibida con respecto a las variables de torrefacción. Se encontró que mientras la impresión global, sistemáticamente presentaba un máximo de respuesta en los rangos estudiados, el rendimiento de extracción presentaba un mínimo, corrido con relación al máximo de impresión global.

Palabras Claves: Café, *Coffea arabica*, procesamiento, industrialización, tostado, temperatura de tostado, agua de apagado, café tostado, calidad, daño de insectos, *Hypothenemus hampei*.

ABSTRACT

The main roasting variables, torrefaction temperature and amount of quenching water were optimized for three kinds of green coffee: healthy coffee consumption type, 100% berry-bored coffee Grade 1, and a mixture between healthy and berry-bored coffee Grades 1 and 2. An experimental design of exposed surface was used. Meaningful response surfaces for the global impression (cup test) and for other complementary variables were found in the three mixtures. No differences among global impression optimum values for the three mixtures were found. Nevertheless, there were differences in the kind of dependence exhibited with respect to the roasting variables. Whereas the global impression always exhibited a systematic maximum response in the studied ranks, the extraction response exhibited a minimum one.

Keywords: Coffee, *Coffea arabica*, processing, industrialization, roasting, roasting temperature, quenching water, roasted coffee, quality, insect damage, *Hypothenemus hampei*.

* Investigador Científico II. Industrialización. Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Chinchiná, Caldas, Colombia.

** Tecnóloga Química en Productos Vegetales.

Experiencias anteriores han mostrado que algunas características extrañas negativas en taza del café pueden atenuarse seleccionando condiciones de proceso adecuadas (10), por lo cual, en este trabajo se estudió la influencia que sobre el café tostado tienen diferentes condiciones de torrefacción, partiendo de una misma calidad de café verde brocado y sano.

Observando la Figura 1 se nota que existen calidades de café brocado que presentan nota de impresión global (12) alrededor de 3, tales como el 100% brocado grado 1, el 30% brocado grado 3, o el 50% brocado grado 2. Surge la pregunta: ¿es posible mediante la elección de condiciones de proceso adecuadas (temperatura de torrefacción y agua de apagado), llegar a obtener notas de impresión global mejores que las obtenidas por Castaño (4), para el mismo tipo de producto?

Lo anterior surge del hecho de que el café verde brocado tiene cavernas internas que lo diferencian del café sano, pero fundamentalmente, el producto restante está en buenas condiciones, si se han observado condiciones adecuadas de beneficio y almacenamiento y podría servir para obtener un adecuado desarrollo aromático durante el proceso de torrefacción, para

lo cual se tendría que buscar sólo condiciones apropiadas de procesamiento para este producto.

Debido a las anteriores consideraciones en la presente investigación se decidió tomar tres calidades de materia prima y mediante un diseño experimental de superficies de respuesta, tratar de optimizar el valor de la prueba de taza encontrando valores óptimos para temperatura de torrefacción y agua de apagado. Adicionalmente a la prueba de taza, se midieron otras variables fisicoquímicas, granulométricas y de preparación del producto con objeto de observar el comportamiento de esta con relación a la calidad de café.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización. El trabajo se realizó en la Planta Piloto de Física Técnica del Programa de Industrialización de Cenicafé, ubicada a una altura sobre el nivel del mar de 1425m, 5° 01' de latitud Norte y 75° 36' de longitud Oeste.

Variables independientes. Se definieron como variables independientes factores inherentes al proceso de Torrefacción, en contraposición al caso de la referencia (4), en la cual se mantuvieron constantes las condiciones de proceso. En este caso se variaron las dos principales variables:

Temperatura de Torrefacción. Aquella a la cual se carga el torrefactor con la materia prima por tostar (°C).

Agua de Apagado. Cantidad de agua que se emplea para enfriar el café una vez se ha llegado al grado de tueste deseado (ml/kg).

Se empleó un tostador dotado de un sistema de agua de apagado (1). Se escogieron tres tipos de materia prima: café almendra sano, 100%

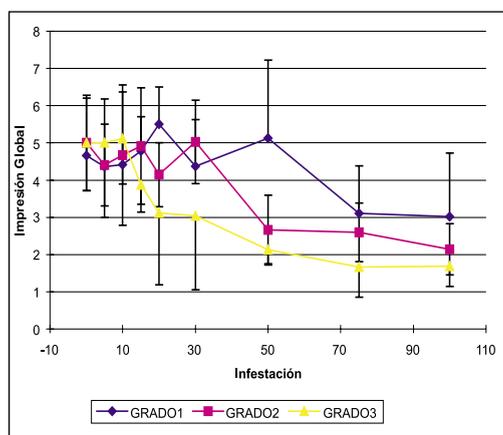


Figura 1. Gráfica de Impresión Global para cada Grado de Brocado. Gráfica obtenida de (4).

café almendra brocado grado1, y una mezcla (50% café almendra sano, 20% brocado grado 2, y 30% brocado grado 1). El café perforado por broca fue sometido a una clasificación en tres grados de brocado, como se observa en la Figura 2. El brocado Grado1 corresponde a un grano con una sola perforación, el grado2 con dos perforaciones, y el grado3, tiene ya una porción, más o menos grande de grano dañado; éste no se empleó en la presente investigación.

La Figura 2 muestra en la parte superior el grano almendra y en la inferior el grano tostado, y hay dos ejemplos de grano brocado grado3. N es un grano normal. El proceso consiste en seleccionar los cafés sanos y brocados (según la clasificación anteriormente descrita) (4), empleados en un experimento de un mismo lote de café almendra procedente de la Estación

Central Naranjal, de Cenicafé, beneficiado en el beneficiadero experimental de Cenicafé, y trillado en la Cooperativa de Caficultores de Manizales en Chinchiná, o en la Planta Piloto de Física Técnica en Cenicafé.

Se efectuó una optimización del proceso de torrefacción para cada una de las materias primas mencionadas, encontrando valores óptimos para la temperatura de torrefacción y el agua de apagado, para cada materia prima mediante un diseño experimental de superficies de respuesta. Se efectuaron en total 11 experimentos. Éstos se plantearon según el diseño experimental de superficies de respuesta que se describe en (9) y con los valores de la Tabla 1. Cada experimento se analizó empleando el lenguaje SAS (15).

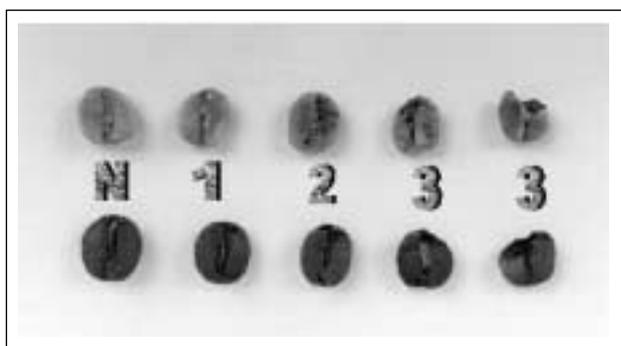


Figura 2.
Clasificación en Grados de Brocada empleada durante la experimentación

Tabla 1. Niveles de los factores del diseño experimental para los 11 experimentos

| Exp | Materia prima | Temperatura (°C) | | | Agua de Apagado (ml) | | |
|-----|---------------|------------------|-----|-----|----------------------|-----|-----|
| | | -at | at | 0t | -aq | aq | 0q |
| 1 | 100G1 | 240 | 300 | 270 | 0 | 160 | 80 |
| 2 | 100G1 | 210 | 270 | 240 | 0 | 160 | 80 |
| 3 | 100G1 | 210 | 270 | 240 | 0 | 160 | 80 |
| 4 | 100G1 | 230 | 260 | 245 | 40 | 120 | 80 |
| 11 | 100G1 | 210 | 270 | 240 | 30 | 190 | 110 |
| 5 | mezcla | 210 | 270 | 240 | 0 | 160 | 80 |
| 6 | mezcla | 210 | 270 | 240 | 30 | 190 | 110 |
| 7 | mezcla | 240 | 300 | 270 | 90 | 250 | 170 |
| 8 | 100normal | 210 | 270 | 240 | 30 | 190 | 110 |
| 9 | 100normal | 240 | 300 | 270 | 90 | 250 | 170 |
| 10 | 100normal | 210 | 270 | 240 | 30 | 190 | 110 |

Tanto al café verde sano, como a la mezcla, y al café verde brocado grado 1, resultantes de la selección y para cada repetición se efectuó un análisis físico, con el objeto de caracterizar el tipo de materia prima siguiendo parámetros estándares de clasificación del café verde (3). Antes de efectuar cada tostación, a la mezcla respectiva se le efectuaron los siguientes análisis:

Humedad café verde (HUMVER). Se midió mediante un medidor de humedad por el método de constante dieléctrica, KAPPA AK60 B (KAPPA JANES LTD. Shepperton, Middx., England) previamente calibrado.

Densidad Aparente Café Verde (DENVER). Debido a la pequeña cantidad de muestra usada, no se empleó la metodología estándar para medir densidad aparente en grano, sino que se recurrió a la norma Técnica Colombiana NTC 4084, Café Tostado y Molido, Método para la Determinación de la Densidad por Compactación (7). Este mismo método se empleó para la determinación de la Densidad Aparente del Café Tostado en Grano, y del Café Tostado y Molido, para lo cual fue específicamente formulada. El equipo empleado fue el Analizador Volumétrico Quantik VU-80. Efectuadas estas medidas se procedió a realizar el proceso de tostado con el equipo en las condiciones de temperatura de carga y agua de apagado definidas en el experimento respectivo. El proceso de tostación se continuó hasta obtener el color requerido (de 330 a 360 según colorímetro Quantik IR-800). Después de realizada la tostación y una vez enfriado el grano, se determinó la merma (PP) según la siguiente fórmula:

$$\% pp = \frac{(w_i - w_f) * 100}{w_i} \ll 1 \gg$$

W_i : Peso inicial café verde

W_f : Peso final café tostado

El café obtenido (900g aprox.), se molió mediante un molino Kenia marca Probat (PROBAT-WERKE von Gimborn Maschinenfabrik GmbH, 100752, D-46427 Emmerich, Alemania), graduado en 2,5 (molienda media, adecuada para la técnica de elaboración de la bebida empleada por el panel de catación). Posteriormente, aproximadamente 250g se enviaron a Panel de Catación.

Diseño Experimental. Con los tres tipos de materia prima se efectuaron 11 experimentos, según el diseño experimental mostrado en la Figura 3. Se efectuaron 5 experimentos para el café brocado grados 1, 3 para la mezcla y 3 para el café sano. Los niveles de los factores del diseño experimental para cada uno de los 11 experimentos se despliegan en la Tabla 1.

Variables dependientes. Como variable dependiente principal se tomó el análisis sensorial o prueba de taza. Adicionalmente se midie-

| <i>T</i> | <i>Q</i> | <i>Tratam</i> |
|------------|------------|---------------|
| <i>at</i> | <i>0q</i> | 1 |
| <i>-at</i> | <i>0q</i> | 2 |
| <i>0t</i> | <i>aq</i> | 3 |
| <i>0t</i> | <i>-aq</i> | 4 |
| <i>0t</i> | <i>0q</i> | 9 |
| <i>0t</i> | <i>0q</i> | 10 |
| <i>0t</i> | <i>0q</i> | 11 |
| <i>1t</i> | <i>1q</i> | 5 |
| <i>-1t</i> | <i>-1q</i> | 6 |
| <i>1t</i> | <i>-1q</i> | 7 |
| <i>-1t</i> | <i>1q</i> | 8 |

Figura 3. Diseño Central Rotable de Superficie de Respuesta empleado.

ron otras variables complementarias como se define a continuación.

Análisis Sensorial. Este análisis se efectuó por el panel de catación de Cenicafé. El café se tostó y molió según sus requerimientos (colores entre 330 y 360, molienda 2,5). Puerta *et al.* (13), describen el funcionamiento de este panel. El panel emplea la siguiente escala en sus calificaciones (14):

- 9, 8, 7: Buena calidad.
- 6, 5, 4: Regular calidad.
- 3, 2, 1: Mala calidad, 1 total rechazo.

Densidad aparente café tostado en grano (DENGRA). Antes de efectuar el molido se midió la densidad aparente del café tostado en grano siguiendo la técnica ICONTEC (7), que a su vez, es la misma usada para determinar la densidad aparente del grano verde.

Coefficiente de hinchamiento (HINCHA). A partir de la densidad aparente del grano verde, la densidad aparente del grano tostado y la merma se definió el coeficiente de hinchamiento << 2 >>.

$$HINCHA = \frac{(DENVER * (1 - \frac{PP}{100}) - DENGRA) * 100}{DENGRA} \quad \ll 2 \gg$$

Donde, HINCHA, DENVER, DENGRA, y PP tienen el significado anteriormente mencionado. Este coeficiente da una idea del grado de “hinchamiento”, que experimenta el grano debido al proceso de tostión.

Densidad aparente del café tostado y molido (DENTYM). Después de molido el café y usando la técnica descrita por ICONTEC (7), para lo cual fue específicamente diseñada, se determinó la densidad aparente del café tostado y molido.

Humedad de café tostado y molido (HUMTOST). Para determinar la humedad en

estufa del café tostado y molido se efectuó el procedimiento descrito por ICONTEC (8).

Color (COLOR). La medida de color se efectuó según ICONTEC (5), excepto en que la granulometría usada para la medida fue la misma que la empleada para realizar el trabajo. Se empleó un Colorímetro Quantik IR-800, el cual se empleó según indica su catálogo (14).

Granulometría. Para determinar el tamaño promedio de partícula para cada tostiión experimental. Se molió el café siempre en las mismas condiciones (molienda media). Se puede suponer que posibles variaciones en la resistencia mecánica del café tostado, debidas a las diferentes condiciones de tostiión, pueden producir parámetros granulométricos diferentes, así se empleen siempre las mismas condiciones de molienda.

Este análisis se efectuó según ICONTEC (6), excepto en que en este caso se usaron los tamices 12, 16, 20, 30, 45, 60, 80, y FONDO según denominación A.S.T.M.E.-11, con el objeto de obtener una mejor resolución de los parámetros granulométricos. El equipo usado fue una máquina tamizadora del tipo RoTap, modelo RX-29, provista de tamices de altura completa, fabricados en acero inoxidable por W.S. TYLER, adaptados a la especificación A.S.T.M.E.-11.

Empleando las técnicas de cálculo matemático indicadas en la norma se encontró para cada experimento el tamaño promedio de partícula (DIAM50) y el índice de uniformidad (DISPERSI). Adicionalmente se calculó el diámetro Rossin-Rammler (DIAM36) (2), que se define como el diámetro para una retención de (100/e) que es aproximadamente 36,8%.

Parámetros medidos sobre extracto de café.

El extracto se preparó en cafetera de goteo marca Proctor-Silex (Cafetera Proctor-Silex,

2-12 cup automatic drip coffeemaker, Hamilton Beach, Proctor-Silex, Inc. Washington, North Carolina 27889). Se utilizó además :

- filtro melitta # 4.
- probeta de 250 ml.
- beacker.
- café tostado y molido.
- agua destilada.

El extracto se obtuvo pesando 18g de café tostado y molido sobre el filtro melitta #4. Se midieron en la probeta 300ml de agua destilada, la cual se depositó en el tanque de la cafetera. Se accionó el interruptor de encendido de la cafetera, dejando enfriar el extracto obtenido hasta que alcanzara la temperatura ambiente. Luego se pesó la bebida. Este peso se utilizó posteriormente para obtener el rendimiento de la extracción.

A partir de este extracto se efectúan las siguientes medidas:

Grados Brix (BRIX). Esta medida se realizó por medio de un refractómetro digital Leica Auto Abbe, efectuándose la lectura en la escala de temperatura corregida con dos cifras decimales de precisión.

Sólidos Solubles (SOLISOL). Por este método los sólidos solubles se determinaron con un proceso similar al de la determinación de humedad, que varía en la muestra a medir. En este caso se adicionan sobre las cajas 10,00g de extracto de café. Esta medida se tomó por triplicado, aplicando la fórmula << 3 >>

$$SS = \frac{(P_f - P_v) * 100}{(P_i - P_v)} \quad \ll 3 \gg$$

Donde las P's significan Peso inicial, final y vacío de la caja de Petri.

pH (PH). Para efectuar esta medida se utilizó un pH-metro digital, Mettler Toledo 340.

Acidez (ACIDEZT). La acidez se midió titulando una muestra diluida de café, (10ml de extracto con 150ml de agua destilada), con NaOH 0,01N hasta obtener un pH de 7,0. La acidez del café se expresó como los ml de NaOH necesarios para neutralizar la muestra diluida.

Rendimiento (RENDIM). El rendimiento de la extracción se calculó a partir del peso del extracto, la fracción de sólidos solubles y la cantidad de café cargado, por medio de la ecuación:

$$RENDIM = \frac{P_{ext} * SOLISOL * 100}{P_c} \quad \ll 4 \gg$$

Donde:

RENDIM=Rendimiento

P_{ext}=Peso extracto obtenido

SOLISOL= Sólidos solubles.

P_c=Peso de café cargado para efectuar la extracción.

Las medidas efectuadas de rendimiento, sólidos solubles y granulometría, tienden a determinar la influencia de la temperatura de torrefacción y la cantidad de agua de apagado en los parámetros que definen la preparación de la bebida para cada tipo de materia prima empleada.

Se efectuaron tres experimentos para café sano, con los parámetros de diseño experimental de superficies de respuesta que se observan en la Tabla 1. En cada experimento se efectuó, un análisis físico de la materia prima empleada, dando el siguiente resultado:

Experimento 8: Consumo superior.

Experimento 9: Consumo.

Experimento 10: Consumo superior.

Se efectuaron tres experimentos para la mezcla, con los parámetros de diseño experi-

mental de superficies de respuesta, que se observan en la Tabla 1. Los experimentos respectivos están marcados con los números 5, 6 y 7 (5). El café almendra sano empleado para efectuar la mezcla resultó clasificado de la siguiente forma:

Experimento 5: Consumo superior.

Experimento 6: Consumo superior.

Experimento 7: Consumo superior.

Se efectuaron cinco experimentos para materia prima constituida por café 100% brocado grado 1, con los parámetros de diseño experimental de superficies de respuesta, que se observan en la Tabla 1. Los experimentos respectivos están marcados con los números 1, 2, 3, 4 y 11. En todos los experimentos, el tipo de materia empleada, ignorando el defecto brocado, obedece por lo demás a la clasificación de café tipo consumo superior.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Café Sano. En la Tabla 2 se muestran estadísticas generales para las variables controladas en los tres experimentos realizados. Se muestran el promedio, la desviación estándar y el coeficiente de variación para la humedad inicial del café verde, la densidad inicial del café verde, la merma en cada serie de tostiones y el color medido directamente en la granulometría empleada. En general, se observan bajos coeficientes de variación en todas las variables controladas. La Tabla 3. muestra los resultados

obtenidos para impresión global en los experimentos 8, 9 y 10. La Figura 4 muestra estos resultados en forma de diagramas de burbuja, para el experimento 8. En estos diagramas se coloca en el eje X, la temperatura de torrefacción (°C) y en el eje Y la cantidad de agua de apagado (ml), el diámetro de cada burbuja es proporcional al valor obtenido para impresión global en el respectivo punto.

El experimento 8 muestra un máximo de impresión global (4,63) en el punto (261°C, 167ml) y presenta valores crecientes para temperaturas superiores a 240°C, y valores de agua de apagado superiores a 110ml. Se efectuó el análisis de superficie de respuesta para los tres experimentos, la Tabla 4. despliega los resultados. Allí se observa que la única superficie de respuesta que ofrece una significancia mayor del 90% es la correspondiente al experimento 8. Por lo cual ésta se analizará más detenida-

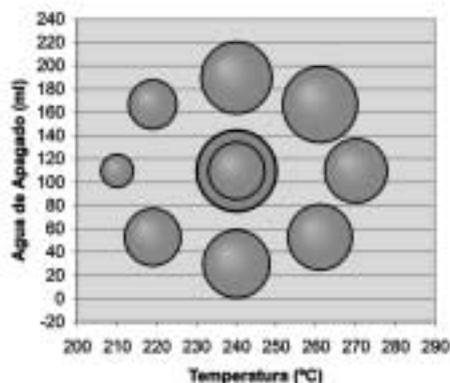


Figura 4. Impresión global vs agua de apagado y temperatura para el Experimento 8.

Tabla 2. Estadísticas descriptivas de las variables controladas para los experimentos correspondientes a café normal

| Experimento | Humedad Verde (%) | | | Densidad Verde (g/ml) | | | Merma (%) | | | Color | | |
|-------------|-------------------|------|------|-----------------------|------|------|-----------|------|------|--------|-------|------|
| | Pro | DE | CV | Pro | DE | CV | Pro | DE | CV | Pro | DE | CV |
| 8 | 10,49 | 0,38 | 3,60 | 0,69 | 0,00 | 0,56 | 12,93 | 0,83 | 6,42 | 351,14 | 8,36 | 2,38 |
| 9 | 11,04 | 0,18 | 1,64 | 0,71 | 0,00 | 0,70 | 12,10 | 1,13 | 9,36 | 349,28 | 10,02 | 2,87 |
| 10 | 11,67 | 0,42 | 3,57 | 0,70 | 0,00 | 0,64 | 14,11 | 0,85 | 6,03 | 351,61 | 9,50 | 2,70 |

Tabla 3. Resultados obtenidos para Impresión Global en los tres experimentos.

| Experimento | Temperatura (°C) | Agua de apagado (ml) | Impresión global |
|-------------|------------------|----------------------|------------------|
| 8 | 210 | 110 | 2,00 |
| 8 | 219 | 53 | 3,50 |
| 8 | 219 | 167 | 3,00 |
| 8 | 240 | 30 | 4,13 |
| 8 | 240 | 110 | 5,00 |
| 8 | 240 | 110 | 4,88 |
| 8 | 240 | 110 | 3,50 |
| 8 | 240 | 190 | 4,38 |
| 8 | 261 | 53 | 4,00 |
| 8 | 261 | 167 | 4,63 |
| 8 | 270 | 110 | 3,88 |
| 9 | 240 | 170 | 4,75 |
| 9 | 249 | 113 | 5,17 |
| 9 | 249 | 227 | 5,40 |
| 9 | 270 | 90 | 6,30 |
| 9 | 270 | 170 | 5,80 |
| 9 | 270 | 170 | 5,90 |
| 9 | 270 | 170 | 5,50 |
| 9 | 270 | 250 | 4,58 |
| 9 | 291 | 113 | 4,80 |
| 9 | 291 | 227 | 4,67 |
| 9 | 300 | 170 | 5,70 |
| 10 | 210 | 110 | 6,00 |
| 10 | 219 | 53 | 2,00 |
| 10 | 219 | 167 | 2,00 |
| 10 | 240 | 30 | 2,00 |
| 10 | 240 | 110 | 6,00 |
| 10 | 240 | 110 | 6,00 |
| 10 | 240 | 110 | 6,00 |
| 10 | 240 | 190 | 6,00 |
| 10 | 261 | 53 | 6,00 |
| 10 | 261 | 167 | 3,00 |
| 10 | 270 | 110 | 2,00 |

Tabla 4. Parámetros de las superficies de respuesta calculadas para los tres experimentos.

| Experimento | 8 | 9 | 10 |
|--------------------|--------|--------|--------|
| R ² | 0,8076 | 0,4386 | 0,3849 |
| Prob>F | | | |
| lineal | 0,0673 | 0,4576 | 0,9124 |
| Cuadrático | 0,0629 | 0,4344 | 0,3646 |
| Punto Estacionario | Máximo | Máximo | Máximo |
| Temperatura (°C) | 260 | 273 | 238 |
| Agua Apagado (ml) | 265 | 133 | 119 |
| Impresión Global | 4,8 | 5,8 | 6 |
| Punto Central | | | |
| Temperatura (°C) | 240 | 270 | 240 |
| Agua Apagado (ml) | 110 | 170 | 110 |
| IT °C | 60 | 60 | 60 |
| IQ ml | 160 | 160 | 160 |

mente no sólo para el caso de la impresión global, sino también para las otras variables.

La Figura 5, es una gráfica de la superficie de respuesta, en la que las porciones de diferentes colores, indican rangos de impresión global como lo indican las leyendas respectivas.

Se observa cómo la superficie de respuesta representa un máximo a una temperatura de 260°C, y a una cantidad de agua de apagado de 265ml esta se ubica fuera del límite de los valores experimentales.

Para el resto de las características organolépticas se observa alguna significancia (aproximadamente 90%), para el término cuadrático sólo para las características acidez organoléptica, amargo y cuerpo. De éstas, la acidez es un punto máximo y las otras dos son puntos de silla.

La Figura 6 muestra la superficie de respuesta teórica, para el caso de la acidez organoléptica. Se observa en esta gráfica una tendencia a mayores valores de acidez, hacia temperaturas y valores de agua de apagado mayores que el punto central.

La superficie de respuesta muestra una dependencia de la acidez más fuerte para el caso de la temperatura y más débil en el caso del agua de apagado. Al comparar los valores del punto crítico con los correspondientes a la impresión global, se observa una coincidencia en lo que al valor de la temperatura se refiere y hay mayor discrepancia en relación con al valor óptimo de agua de apagado. Para este caso y empleando las mismas técnicas, se analizaron igualmente las variables complementarias mediante la técnica de superficies de respuesta. Se encontró significancia en la densidad del grano tostado, la densidad del tostado y molido y el coeficiente de hinchamiento.

En la Tabla 5 se observan los parámetros de las superficies de respuesta para la densidad del

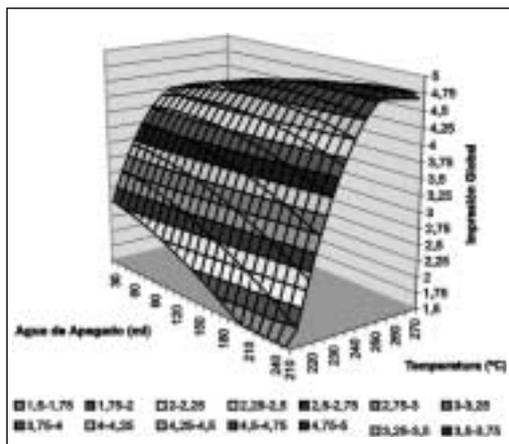


Figura 5. Impresión global, contra agua de apagado y temperatura para el experimento 8.

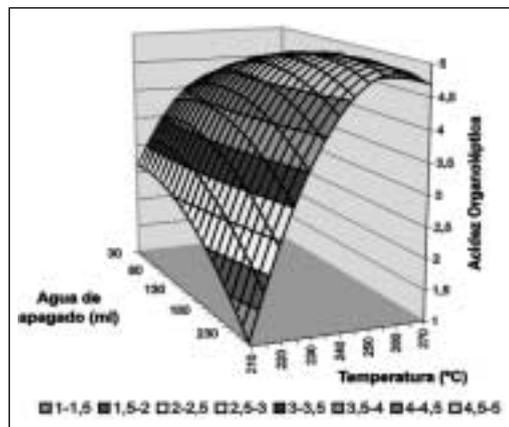


Figura 6. Superficie de respuesta para Acidez Organoléptica, Experimento 8.

Tabla 5. Parámetros de las Superficies de respuesta para Densidad Grano Tostado Entero, Grano Tostado y Molido, e Hinchamiento, correspondientes al Experimento 8.

| Característica | Densidad Grano Tostado | Densidad Tostado y Molido | Hinchamiento |
|--------------------|------------------------|---------------------------|--------------|
| R ² | 0,933 | 0,742 | 0,8772 |
| Prob>F | | | |
| lineal | 0,003 | 0,0534 | 0,0159 |
| Cuadrático | 0,0391 | 0,2942 | 0,1775 |
| Punto Estacionario | Mínimo | Mínimo | Silla |
| Temperatura (°C) | 293 | 257 | 214 |
| Agua Apagado (ml) | -73 | 126 | 253 |
| Valor | 0,429 | 0,46 | 0,34 |

grano tostado entero, la densidad del producto tostado y molido, y el coeficiente de hinchamiento; variable relacionada con la densidad del grano entero tostado, el grano entero verde y la merma durante el proceso de tostión y que mide el coeficiente de aumento de tamaño del café tostado producto de las reacciones de torrefacción.

La Figura 7 muestra la superficie de respuesta teórica de la densidad del grano entero; en esta gráfica se observa un mínimo de densidad en el punto 257°C, y 126ml de agua de apagado. Igualmente se observa un aumento de densidad a bajas temperaturas de tostión, siendo menor el efecto del agua de apagado, que sin embargo también presenta un efecto mucho más leve.

La Figura 8 muestra la superficie de respuesta teórica para el coeficiente de hinchamiento. Este presenta un punto de silla de 34% para 214°C de temperatura y 253ml de agua de apagado.

Se observa que dependiendo de la cantidad de agua de apagado, el coeficiente de hinchamiento tiende a aumentar al aumentar la tempe-

ratura, hasta una valor de agua de apagado de 253ml, a partir del cual la tendencia se invierte; sin embargo, este valor está por fuera de los límites experimentales.

Humedad del producto tostado y molido pH y acidez titulable. Otra de las variables complementarias importantes, sobre todo cuando se trabaja con agua de apagado es la humedad final del producto tostado. Para este caso en especial los parámetros de superficie de respuesta de la variable humedad (humtost), no presentaron significancia, por tanto, no se presentan.

Las más altas humedades (3,6%, aproximadamente), se observaron para los mayores valores de agua de apagado sin importar la temperatura usada; sin embargo, para aguas de apagado de 50ml también se encuentran humedades altas en los productos, lo que hace que las dependencias no sean muy claras.

En general, se puede concluir que existe cierta tendencia al aumento de la humedad final de los productos al emplear agua de apagado; sin embargo, en ningún caso está humedad su-

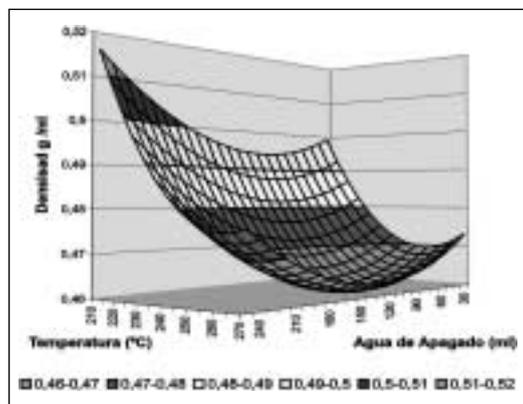


Figura 7. Superficie de respuesta teórica de la Densidad del Grano Entero, en el experimento 8.

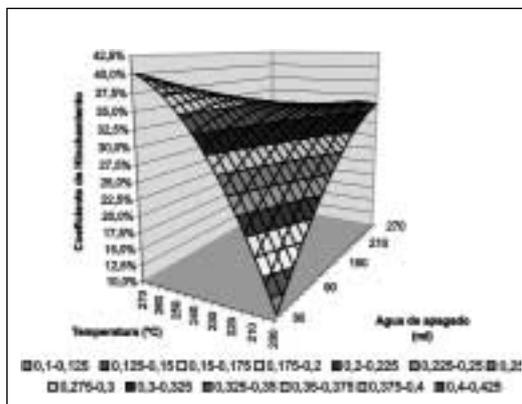


Figura 8. Superficie de respuesta teórica del Coeficiente de Hinchamiento del Café Tostado, en el experimento 8.

peró el mínimo exigido según norma ICONTEC (5%).

Tampoco para el pH y la acidez titulable, otras dos importantes características del extracto preparado de café, se observaron parámetros de superficie de respuesta significativos. En lo que se refiere al pH se observa una notable constancia del valor (alrededor de 4,9) en todos los casos. La acidez titulable de la bebida muestra una mayor variación, estando los menores valores de acidez titulable alrededor de un valor de agua de apagado de 110ml. En el resto de puntos no se observa una tendencia clara. El máximo valor de acidez se ubica a una temperatura de 260 °C, y agua de apagado de 30ml.

Parámetros de extracción. Entre los parámetros de extracción o de preparación de la bebida estudiados se encuentran: grados Brix, sólidos solubles y rendimiento. La Tabla 6 muestra los parámetros de superficie de respuesta encontrados para estas variables. En esta tabla se observa una significancia entre el 90% y el 95%, para las tres variables.

La Figura 9 muestra la superficie de respuesta teórica para grados Brix, como se observa tanto en la Tabla como en la otra gráfica los °Brix de la bebida exhiben un mínimo en el

Tabla 6. Parámetros de las superficies de respuesta para las variables de extracción de la bebida correspondientes al experimento 8.

| Característica | Brix | Sólidos solubles (% estufa) | Rendimiento (%) |
|------------------|--------|-----------------------------|-----------------|
| R ² | 0,6247 | 0,7939 | 0,7804 |
| Prob>F | | | |
| lineal | 0,4823 | 0,1273 | 0,1438 |
| Cuadrático | 0,1233 | 0,0423 | 0,0482 |
| Punto | | | |
| Estacionario | Mínimo | Mínimo | Mínimo |
| Temperatura (°C) | 239 | 234 | 234 |
| Agua | | | |
| Apagado (ml) | 74 | 96 | 96 |
| Valor | 1,6 | 1,3 | 17,3 |

valor de 1,64 para una temperatura de 238°C, y el agua de apagado de 74ml. Comportamiento análogo muestra la variable relacionada sólidos solubles (Figura 10), la cual también exhibe un mínimo en un punto muy próximo (235°C, 90ml), de valor 1,3%. O sea en este punto se obtienen bebidas menos concentradas. Se observa también en la Figura 9, que los sólidos solubles tienden a crecer más fuertemente a temperaturas y cantidades de agua de apagado

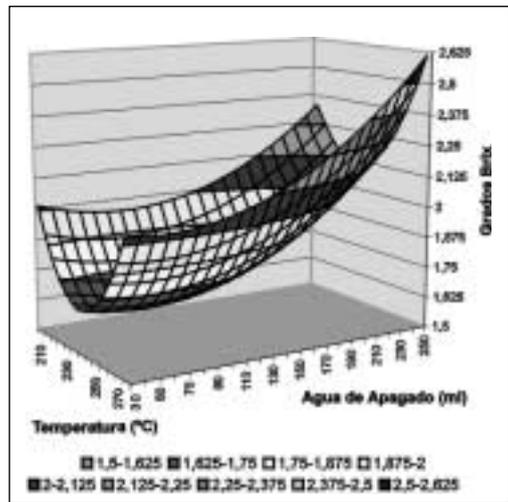


Figura 9. Superficie de respuesta Teórica de los Grados Brix de la bebida, en el experimento 8.

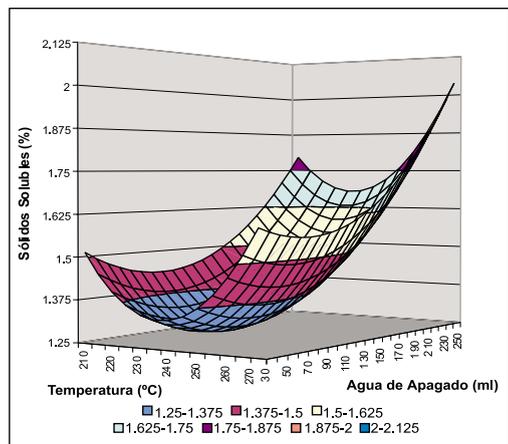


Figura 10. Superficie de respuesta Teórica de los Sólidos Solubles de la bebida, en el experimento 8.

altas, mientras que a temperaturas altas y cantidades de agua de apagado bajas, la concentración de sólidos solubles también aumenta pero en menor proporción. Se observa en este caso una fuerte influencia tanto del agua de apagado como de la temperatura en ambos parámetros.

Como era de esperarse, al mínimo mostrado de sólidos solubles corresponde un mínimo de rendimiento (Figura 11), que corresponde a la superficie de respuesta teórica para el rendimiento de extracción.

Se observa en ella un mínimo con un valor de 17,3% en el punto correspondiente a 234°C, 96,3ml, muy cerca del presentado por los sólidos solubles. Igualmente la gráfica exhibe rendimientos altos a temperaturas altas, sin importar el valor del agua de apagado. A temperaturas

bajas exhibe rendimientos también mayores. Es interesante notar que mientras la impresión global en el rango estudiado exhibe un máximo, las variables anteriormente estudiadas exhiben un mínimo. Adicionalmente, el punto óptimo de prueba de taza está desplazado con respecto al punto mínimo de rendimiento; a temperaturas y aguas de apagado mayores. Esto sugiere que el punto mínimo de rendimiento no corresponde a las mejores pruebas de taza y que, en general, las mejores pruebas de taza exhibirán rendimientos mayores.

Parámetros granulométricos. En relación con la preparación de la bebida son de gran importancia los parámetros que definen la distribución granulométrica resultante de unas determinadas condiciones de molienda. Se empleó una granulometría definida por la posición 2,5 de la escala de molienda del molino empleado. Este grado de molienda fue constante, pero cabe preguntarse si efectivamente las variaciones de las variables de torrefacción no producirán cambios en la resistencia mecánica del producto tostado que se vean reflejados, en el comportamiento granulométrico de los productos. La Tabla 7 muestra los parámetros de las superficies de respuesta para estas variables. Se observa que sólo los parámetros de superficie de respuesta correspondientes al índice de uniformidad, presentan significancia. La Figura 12 muestra la superficie de respuesta teórica para el índice. En la Tabla 7 se observa que el valor crítico correspondiente a esta superficie se encuentra a una temperatura de 360

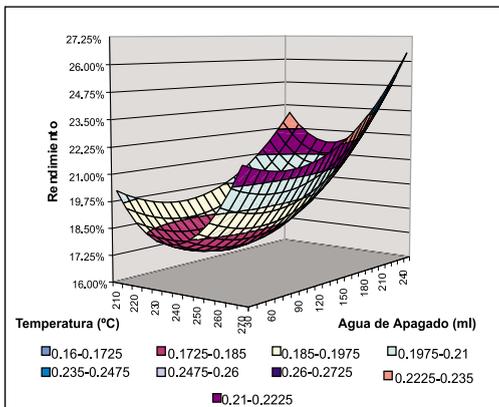


Figura 11. Superficie de respuesta teórica de Rendimiento de Extracción, en el experimento 8.

Tabla 7. Parámetros de las superficies de respuesta para las variables granulométricos correspondientes al Experimento 8.

| Característica | DIAM50(mm) | DIAM36(mm) | DISPERSI | CORRELAC |
|---------------------|------------|------------|----------|----------|
| R ² | 0,4602 | 0,4996 | 0,7482 | 0,4367 |
| Prob>F | | | | |
| lineal | 0,3318 | 0,2989 | 0,0753 | 0,8321 |
| Cuadrático | 0,5524 | 0,4695 | 0,1467 | 0,5541 |
| Punto Estacionario | Silla | Silla | Silla | Silla |
| Temperatura (°C) | 245 | 244 | 360 | 236 |
| Agua Apagado (ml) - | 8 | -0,81 | 103 | 94 |
| Valor | 0,7089 | 0,6226 | 2,63 | 0,96 |

°C, muy por fuera del rango experimental, y la cantidad de agua de apagado es de 103ml, por lo cual, sólo se grafica el rango estudiado, pues la temperatura de 360°C, es demasiado alta para el tostador empleado en el presente trabajo. El valor crítico es un punto de silla el cual no se observa en la gráfica por las razones anotadas. Resalta el hecho de que en lo que al agua de apagado se refiere las curvas presentan un máximo en 103ml, aumentando desde 0 a 103, y disminuyendo para valores mayores. Este índice es una medida de lo “puntudo” de la distribución granulométrica, o sea, para valores de agua de apagado entre 0 y 103, la distribución es progresivamente más “puntuda”, sugiriendo menos presencia de finos a medida que la cantidad de agua de apagado va aumentando. La Figura 12 también muestra una disminución del índice a medida que la temperatura de tostión aumenta sugiriendo una mayor presencia de finos a temperaturas de tostión altas.

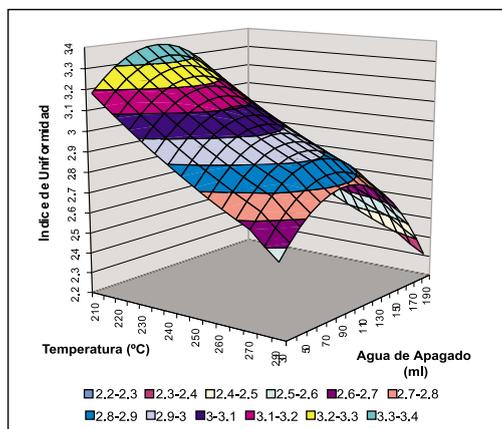


Figura 12. Superficie de respuesta teórica del Índice de Uniformidad Granulométrico, en el experimento 8.

Pero, definitivamente, el parámetro granulométrico que presenta más variabilidad en función de la temperatura de torrefacción y la cantidad de agua de apagado es el índice de uniformidad.

Mezcla. En la Tabla 8 se muestran estadísticas generales para las variables controladas en los tres experimentos efectuados para la mezcla. Se muestran el promedio, la desviación estándar, y el coeficiente de variación para la humedad inicial del café verde, la densidad inicial del café verde, la merma en cada serie de tostiones, y el color medido directamente en la granulometría empleada. En general, se observa en todas las variables controladas, los bajos coeficientes de variación obtenidos.

La Tabla 9 muestra los resultados obtenidos para impresión global en los experimentos 5, 6 y 7. Para cada caso y con los parámetros de tostión correspondientes al punto central, se tostó, con propósitos de comparación, un producto 100% sano, correspondiente al café sano de cada experimento. Las últimas tres líneas de la Tabla 11 muestran los resultados correspondientes. Allí resalta el hecho de que cuando se comparan con las mezclas tostadas a las mismas condiciones, las notas de impresión global no fueron especialmente diferentes.

Las Figura 13 muestra éstos resultados en forma de diagramas de burbuja para el caso del Experimento 6. En este caso se emplearon valores de agua de apagado entre 30 y 190ml y temperaturas entre 210 y 270°C, evidenciándose definitivamente una tendencia a obtener

Tabla 8. Estadísticas descriptivas de las variables controladas para los experimentos correspondientes a la mezcla

| | | Humedad Verde(%) | | | Densidad Verde / g | | | | | | | |
|-------------|-----------|------------------|------|-------|--------------------|-------|-------|------|------|--------|-------|------|
| /ml | Merma (%) | | | Color | | | | | | | | |
| Experimento | Pro | DE | CV | Pro | DE | CV | Pro | DE | CV | | | |
| 5 | 10,89 | 0,48 | 4,43 | 0,70 | 0,01 | 1,13 | 13,21 | 0,71 | 5,48 | 346,56 | 9,79 | 2,83 |
| 6 | 9,59 | 0,20 | 2,07 | 0,68 | 0,01 | 0,85 | 12,74 | 0,90 | 7,14 | 344,00 | 14,54 | 4,23 |
| 7 | 10,49 | 0,40 | 3,77 | 0,68 | 0,00 | 0,651 | 3,03 | 0,75 | 6,21 | 342,31 | 10,00 | 2,92 |

Tabla 9. Resultados obtenidos para impresión global en los tres experimentos, empleando la mezcla como materia prima.

| Materia Prima | Experimento | Temperatura (°C) | Agua de apagado (ml) | Impresión global |
|---------------|-------------|------------------|----------------------|------------------|
| Mezcla | 5 | 240 | 160 | 4,83 |
| Mezcla | 5 | 240 | 80 | 5,08 |
| Mezcla | 5 | 219 | 23,5 | 4,83 |
| Mezcla | 5 | 240 | 80 | 5,00 |
| Mezcla | 5 | 210 | 80 | 3,67 |
| Mezcla | 5 | 240 | 0 | 3,83 |
| Mezcla | 5 | 240 | 80 | 3,75 |
| Mezcla | 5 | 261 | 23,5 | 4,25 |
| Mezcla | 5 | 261 | 136,5 | 3,13 |
| Mezcla | 5 | 270 | 80 | 4,88 |
| Mezcla | 5 | 219 | 136,5 | 3,38 |
| Mezcla | 6 | 240 | 190 | 5,21 |
| Mezcla | 6 | 240 | 110 | 4,71 |
| Mezcla | 6 | 261 | 167 | 5,64 |
| Mezcla | 6 | 240 | 110 | 5,07 |
| Mezcla | 6 | 240 | 110 | 5,43 |
| Mezcla | 6 | 270 | 110 | 5,14 |
| Mezcla | 6 | 219 | 53 | 3,40 |
| Mezcla | 6 | 219 | 167 | 4,00 |
| Mezcla | 6 | 210 | 110 | 3,80 |
| Mezcla | 6 | 261 | 53 | 3,40 |
| Mezcla | 6 | 240 | 30 | 2,60 |
| Mezcla | 7 | 240 | 170 | 3,50 |
| Mezcla | 7 | 270 | 170 | 4,75 |
| Mezcla | 7 | 270 | 170 | 5,75 |
| Mezcla | 7 | 291 | 113 | 6,00 |
| Mezcla | 7 | 270 | 90 | 5,75 |
| Mezcla | 7 | 270 | 170 | 6,00 |
| Mezcla | 7 | 300 | 170 | 5,88 |
| Mezcla | 7 | 249 | 113 | 6,00 |
| Mezcla | 7 | 291 | 227 | 6,125 |
| Mezcla | 7 | 249 | 227 | 6 |
| Mezcla | 7 | 270 | 250 | 6,125 |
| Normal | 5 | 240 | 80 | 4,25 |
| Normal | 6 | 240 | 110 | 5,36 |
| Normal | 7 | 270 | 170 | 4,50 |

Tabla 10. Parámetros de las superficies de respuesta calculadas para los experimentos 5, 6 y 7.

| EXPERIMENTO | 5 | 6 | 7 |
|--------------------|--------|--------|--------|
| R ² | 0,1685 | 0,9616 | 0,5043 |
| Prob>F | | | |
| lineal | 0,8581 | 0,0026 | 0,365 |
| Cuadrático | 0,7319 | 0,0327 | 0,3514 |
| Punto Estacionario | Máximo | Máximo | Máximo |
| Temperatura (°C) | 243 | 271 | 290 |
| Agua Apagado (ml) | 64 | 177 | 162 |
| Impresión Global | 4,64 | 5,87 | 5,7 |
| Punto Central | | | |
| Temperatura (°C) | 240 | 240 | 270 |
| Agua Apagado (ml) | 80 | 110 | 170 |
| IT °C | ∅ | ∅ | ∅ |
| IQ ml | 160 | 160 | 160 |

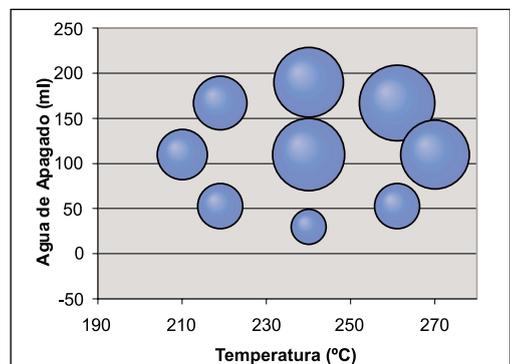


Figura 13. Gráfica de la impresión global, contra agua de apagado y temperatura para el experimento 6.

mejores valores de prueba de taza a altos niveles de temperatura y agua de apagado (6).

Se efectuó entonces el análisis de superficie de respuesta para los tres experimentos. La Tabla 10 despliega los resultados. Allí se observa que la única superficie de respuesta que ofrece una significancia mayor del 96% es la correspondiente al Experimento 6. Por lo cual, ésta se analizará más detenidamente no sólo para el caso de la impresión global, sino también para las otras variables. La Figura 14 es una gráfica de la superficie de respuesta teórica. Se observa en esta gráfica, que la superficie de respuesta representa un máximo a una temperatura de 271°C, y cantidad de agua de apagado de 177ml, ésta se ubica muy cerca del borde de los valores experimentales. En lo que se refiere al resto de las características organolépticas, se observa significancia estadística (94% y 99%), en el término cuadrático sólo para las características acidez organoléptica y cuerpo, y ambas representan un máximo.

La Figura 15 muestra la superficie de respuesta teórica de la densidad del producto tostado y molido, en esta gráfica se observa un mínimo de densidad en el punto 260°C, y 174ml de agua de apagado. Igualmente se observa un aumento de densidad a bajas temperaturas de tostión, siendo comparables ambos efectos. La Figura 16 muestra los datos experimentales para el coeficiente de hinchamiento. Se observan altos coeficientes a temperaturas altas de tostión independientemente de la cantidad de agua de apagado, lo cual es lógico puesto que las altas temperaturas tienden a producir mayor aumento de volumen del grano y como consecuencia, menor densidad.

Humedad del producto tostado y molido. Para el caso de la humedad del producto (HUMTOST), los parámetros de superficie de respuesta no presentaron significancia ($R^2=0,7714$, $Pr>f=0,7502$), por lo que no se presentan. En este caso hubo las más altas

humedades (2,1% aproximadamente), para los mayores valores de agua de apagado, sin importar la temperatura usada. En general, se puede concluir que existe tendencia al aumento de la humedad final de los productos al emplear agua de apagado. La Figura 17 muestra la superficie de respuesta teórica para el caso de la acidez organoléptica. Se observa en estas gráficas una tendencia a mayores valores de acidez hacia temperaturas y valores de agua de apagado ma-

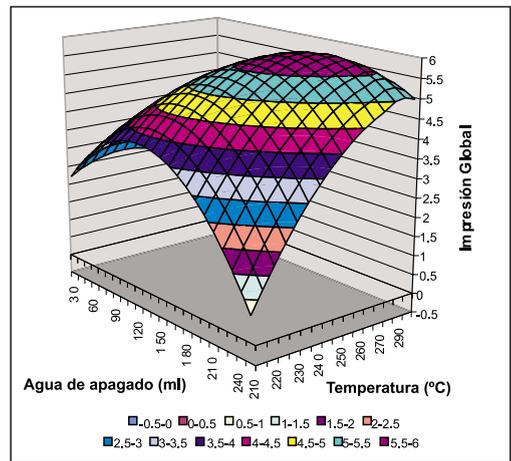


Figura 14. Superficie de respuesta para impresión global, Experimento 6.

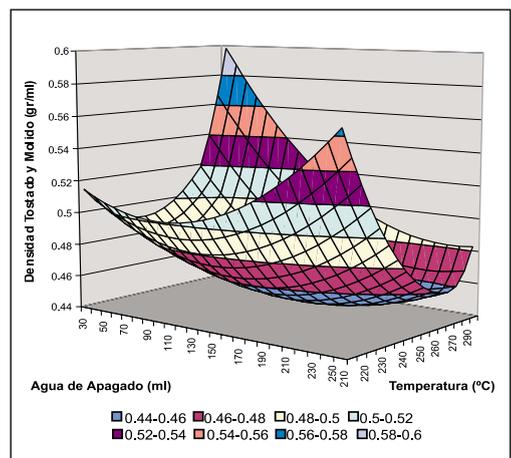


Figura 15. Superficie de respuesta teórica de densidad tostado y molido, en el experimento 6.

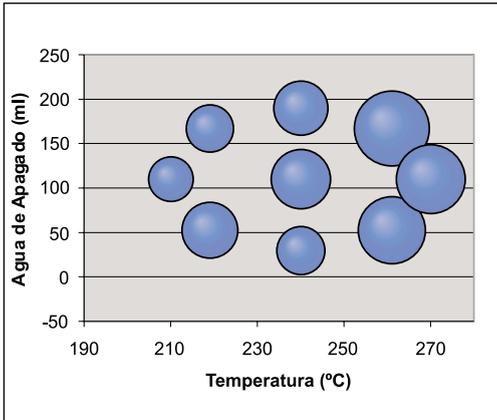


Figura 16. Datos experimentales para coeficiente de hinchamiento, en el experimento 6

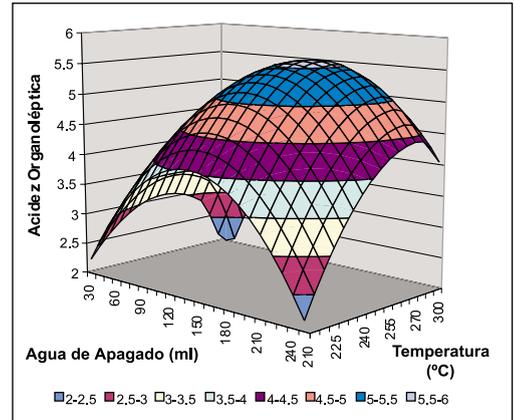


Figura 17. Superficie de respuesta teórica para Acidez Organoléptica en el experimento 6.

yores, con relación al punto central. La superficie de respuesta muestra dependencias de la acidez de igual magnitud tanto para el caso de la temperatura, como para el caso del agua de apagado. Al comparar los valores del punto crítico con los correspondientes a la impresión global, se observa una coincidencia en los valores de ambos parámetros (temperatura y agua de apagado).

Densidad del grano tostado, densidad del grano tostado y molido e hinchamiento. La Tabla 11 muestra los parámetros de las superficies de respuesta para la densidad del grano tostado entero, la densidad del producto tostado y molido y el coeficiente de hinchamiento, variable relacionada con la densidad del grano entero tostado, el grano entero verde y la merma, y que mide el coeficiente de aumento de tamaño del café tostado producto de las reacciones de torrefacción. Se observa que a pesar de que en general los R^2 son altos las probabilidades del término cuadrático son bajas excepto para el caso de la densidad del producto tostado y molido.

pH y acidez titulable. La Tabla 12 muestra los parámetros de pH y acidez titulable, otras dos importantes características del extracto prepa-

Tabla 11. Parámetros de las superficies de respuesta para Densidad Grano Tostado Entero, Grano Tostado y Molido, e Hinchamiento correspondiente al Experimento 6.

| Característica | Densidad Grano Tostado | Densidad Tostado y Molido | Hinchamiento |
|--------------------|------------------------|---------------------------|--------------|
| R^2 | 0,8297 | 0,8955 | 0,8556 |
| Prob>F | | | |
| lineal | 0,0328 | 0,0231 | 0,0262 |
| Cuadrático | 0,8774 | 0,1105 | 0,6145 |
| Punto Estacionario | Silla | Mínimo | Silla |
| Temperatura (°C) | 215 | 260 | 220 |
| Agua Apagado (ml) | -11 | 174 | 30 |
| Valor | 0,455 | 0,45 | 0,31 |

Tabla 12. Parámetros de las superficies de respuesta para el pH, y la Acidez Titulable del extracto correspondientes al Experimento 6.

| Característica | pH | Acidez Titulable (ml de NaOH 0,01 N) |
|--------------------|--------|--------------------------------------|
| R^2 | 0,8029 | 0,5473 |
| Prob>F | | |
| lineal | 0,154 | 0,3167 |
| Cuadrático | 0,087 | 0,7114 |
| Punto Estacionario | Mínimo | Silla |
| Temperatura (°C) | 247 | 248 |
| Agua Apagado (ml) | 128 | 199 |
| Valor | 4,92 | 7,59 |

rado de café. Allí se observa que, en este caso, muestra significancia estadística la superficie de respuesta correspondiente al pH (Figura 18); se observa allí un mínimo de valor 4,92 a una temperatura de 247°C, y 128ml.

Con relación a la acidez titulable de la bebida, no se observa una tendencia definida. Se observa una concentración mayor de valores altos de acidez a temperaturas altas y valores intermedios de agua de apagado.

Parámetros de extracción. La Tabla 13 muestra los parámetros de superficie de respuesta encontrados para estas variables complementa-

Tabla 13. Parámetros de las superficies de respuesta para la extracción de la bebida correspondientes al Experimento 6.

| Característica | Brix | Sólidos solubles (% estufa) | Rendimiento (%) |
|--------------------|--------|-----------------------------|-----------------|
| R ² | 0,7073 | 0,6854 | 0,6794 |
| Prob>F | | | |
| lineal | 0,3883 | 0,1356 | 0,1433 |
| Cuadrático | 0,1652 | 0,4708 | 0,4603 |
| Punto Estacionario | Mínimo | Mínimo | Mínimo |
| Temperatura (°C) | 236 | 227 | 226 |
| Agua Apagado (ml) | 81 | 77 | 93 |
| Valor | 1,48 | 1 | 13,7 |

rias. Se observa una significancia alrededor del 84% para °Brix. Para sólidos solubles de estufa y rendimiento la significancia del término cuadrático es muy baja.

La Figura 19 muestra la superficie de respuesta teórica para °Brix, como se observa también en gráfica de los °Brix de la bebida, que exhiben un mínimo en el valor de 1,48 para una temperatura de 236°C, y un agua de apagado de 81ml, valores muy parecidos a los exhibidos por el café sano.

Comportamiento análogo muestra la variable relacionada sólidos solubles, a pesar de que los parámetros de la superficie de respuesta no son significativos. También exhibe un mínimo en un punto muy próximo (227°C, 77ml), de valor 1. O sea, en este punto se obtienen bebidas menos concentradas. Se observa también en la Figura 19 que los sólidos solubles tienden a crecer más fuertemente a temperaturas y cantidades de agua de apagado altas, mientras que a temperaturas altas y cantidades de agua de apagado bajas la concentración de sólidos solubles también aumenta pero en menor proporción. Se observa en este caso una fuerte influencia tanto del agua de apagado, como de la temperatura en ambos parámetros.

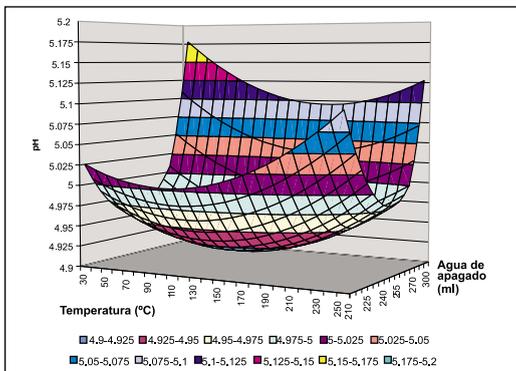


Figura 18. Superficie de respuesta teórica del pH del extracto, en el experimento 6.

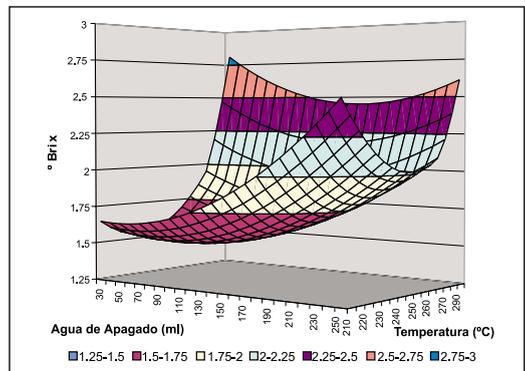


Figura 19. Superficie de respuesta teórica de los Grados Brix de la bebida, en el experimento 6.

A pesar de que tampoco la superficie de respuesta correspondiente al rendimiento tiene un comportamiento significativo, exhibe un valor mínimo. Los valores experimentales de rendimiento confirman la presencia de este mínimo en un valor de 13,7% en (226°C, 93ml). Resalta el hecho de que mientras la impresión global en el rango estudiado exhibe un máximo, las variables anteriormente reseñadas exhiben un mínimo. Adicionalmente el punto óptimo de prueba de taza está desplazado con respecto al punto mínimo de rendimiento, es decir, se ubica a temperaturas y valores de agua de apagado mayores. Esto sugiere que el punto mínimo de rendimiento no corresponde a las mejores pruebas de taza y que, en general, las mejores pruebas de taza exhibirán rendimientos mayores.

Parámetros granulométricos. La Tabla 14 muestra los parámetros de las superficies de respuesta para estas variables. Se observa en esta Tabla que sólo los parámetros de superficie de respuesta correspondientes al índice de uniformidad presentan significancia, por lo que sólo se desplegarán las gráficas correspondientes a éste.

La Figura 20 muestra la superficie de respuesta teórica para el índice de uniformidad de la distribución. En la Tabla 14 se observa que el valor crítico correspondiente a esta superficie se encuentra a una temperatura de 244 °C, y la cantidad de agua de apagado es de 118 ml. El

valor crítico es un máximo, contrariamente a lo ocurrido en el caso del producto sano, donde resultó ser un punto de silla muy alejado del intervalo experimental.

Resalta el hecho de que en lo que al agua de apagado se refiere las curvas presentan un máximo en 118ml, aumentando desde 0 a 118, y disminuyendo para valores mayores. El índice de uniformidad es una medida de lo “puntudo” de la distribución granulométrica, o sea para valores de agua de apagado entre 0 y 118, la distribución es progresivamente más “picuda”, sugiriendo menos presencia de finos a medida que la cantidad de agua de apagado va aumentando. La figura también muestra un comporta-

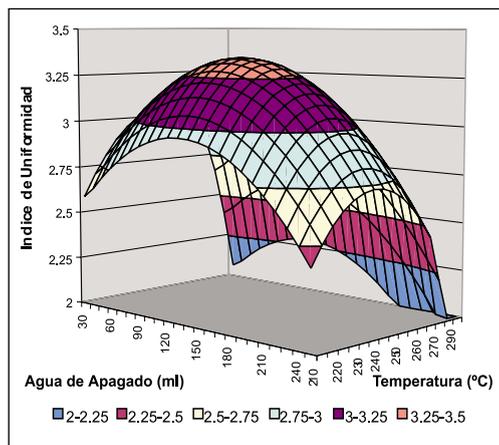


Figura 20. Superficie de respuesta teórica del índice de Uniformidad Granulométrico, en el experimento 6.

Tabla 14. Parámetros de las superficies de respuesta para los parámetros granulométricos correspondientes al experimento 6.

| Característica | DIAM50 (mm) | DIAM36 (mm) | DISPERSI | CORRELAC |
|--------------------|-------------|-------------|----------|----------|
| R ² | 0,6114 | 0,5723 | 0,6429 | 0,6328 |
| Prob>F | | | | |
| lineal | 0,3688 | 0,3886 | 0,486 | 0,2581 |
| Cuadrático | 0,2697 | 0,3277 | 0,1814 | 0,3288 |
| Punto Estacionario | Máximo | Máximo | Máximo | Mínimo |
| Temperatura (°C) | 247 | 247 | 244 | 251 |
| Agua Apagado (ml) | 120 | 121 | 118 | 108 |
| Valor | 0,6162 | 0,689 | 3,28 | 0,9675 |

miento análogo del índice de uniformidad en relación con la temperatura de tostión, la cual presenta un máximo en 244°C.

100% Grado 1. En la Tabla 15 se muestran estadísticas generales para las variables controladas en los cinco experimentos efectuados para esta calidad de materia prima. Se muestra el promedio, la desviación estándar y el coeficiente de variación para la humedad inicial del café verde, la densidad inicial del café verde, la merma en cada serie de tostiones, y el color medido directamente en la granulometría empleada. En general se observa en todas las variables controladas los bajos coeficientes de variación obtenidos (2).

La Tabla 16 muestra los resultados obtenidos para impresión global en los experimentos 1, 2, 3, 4 y 11. Para el experimento 11 y con los parámetros de tostión correspondientes al punto central, se tostó, con propósitos de comparación, un producto sano. La última línea muestra los resultados correspondientes. Allí resalta el hecho de que cuando se comparan con las mezclas tostadas a las mismas condiciones la nota de impresión global no fue especialmente diferente.

Se efectuó el análisis de superficie de respuesta para los cinco experimentos. La Tabla 17 muestra los resultados. Allí se observa que la única superficie de respuesta que ofrece una significancia mayor del 94% es la correspondiente al experimento 2. Por lo cual, ésta se analizará más detenidamente no sólo para el

caso de la impresión global, sino también para las otras variables.

La Figura 21 muestra los resultados en forma de diagrama de burbuja. En este experimento se empleó un intervalo de temperaturas entre 210 y 270°C, con un intervalo de agua de apagado que va desde 0 hasta 160ml, y allí se evidencia una tendencia a obtener mejores valores de prueba de taza a niveles de temperatura entre 240 y 260°C, y todas las magnitudes de agua de apagado excepto cero. En este caso el R^2 , de la superficie de respuesta tuvo un valor de 0,8215.

La Figura 22 es una gráfica de la superficie de respuesta. En esta gráfica las porciones de diferentes colores indican rangos de impresión global como lo indican las leyendas respectivas. Se observa, como la superficie de respues-

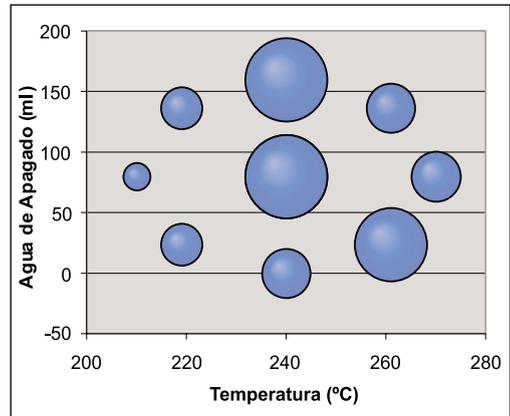


Figura 21. Gráfica de la impresión global, contra agua de apagado y temperatura para el experimento 2.

Tabla 15. Estadísticas descriptivas de las variables controladas para los experimentos correspondientes al producto 100% brocado grado 1.

| Experimento | Humedad Verde (%) | | | Densidad Verde (g/ml) | | | Merma (%) | | | Color | | |
|-------------|-------------------|------|------|-----------------------|------|------|-----------|------|------|--------|-------|------|
| | Pro | DE | CV | Pro | DE | CV | Pro | DE | CV | Pro | DE | CV |
| 1 | 9,38 | 0,21 | 2,26 | 0,70 | 0,01 | 0,73 | 13,15 | 0,42 | 3,22 | 343,64 | 12,21 | 3,55 |
| 2 | 9,23 | 0,25 | 2,72 | 0,69 | 0,01 | 0,80 | 12,91 | 0,41 | 3,15 | 342,18 | 12,92 | 3,78 |
| 3 | 9,64 | 0,17 | 1,79 | 0,69 | 0,01 | 1,17 | 13,21 | 0,50 | 3,78 | 348,94 | 12,12 | 3,47 |
| 4 | 9,32 | 0,11 | 1,15 | 0,66 | 0,01 | 2,06 | 12,74 | 0,30 | 2,38 | 339,91 | 9,90 | 2,91 |
| 11 | 11,23 | 0,51 | 4,51 | 0,69 | 0,01 | 0,86 | 13,69 | 0,98 | 7,17 | 345,58 | 9,64 | 2,79 |

Tabla 16. Resultados obtenidos para Impresión Global en los cinco experimentos, empleando Café 100% brocado grado 1 como materia prima.

| Materia Prima | Experimento | Temperatura (°C) | Agua de apagado (ml) | Impresión global |
|---------------|-------------|------------------|----------------------|------------------|
| 100G1 | 1 | 270 | 180 | 2,86 |
| 100G1 | 1 | 249 | 136, | 5 4,86 |
| 100G1 | 1 | 291 2 | 3,5 | 4,86 |
| 100G1 | 1 | 270 | 80 | 3,29 |
| 100G1 | 1 | 291 | 136,5 | 4,43 |
| 100G1 | 1 | 300 | 80 | 3,29 |
| 100G1 | 1 | 270 | 0 | 2,50 |
| 100G1 | 1 | 240 | 80 | 5,83 |
| 100G1 | 1 | 249 | 23,5 | 6,00 |
| 100G1 | 1 | 270 | 80 | 6,00 |
| 100G1 | 1 | 270 | 80 | 1,83 |
| 100G1 | 2 | 270 | 80 | 2,38 |
| 100G1 | 2 | 240 | 80 | 4,00 |
| 100G1 | 2 | 240 | 80 | 3,90 |
| 100G1 | 2 | 240 | 80 | 4,00 |
| 100G1 | 2 | 261 | 23,5 | 3,50 |
| 100G1 | 2 | 240 | 160 | 4,00 |
| 100G1 | 2 | 219 | 136,5 | 2,00 |
| 100G1 | 2 | 261 | 136,5 | 2,33 |
| 100G1 | 2 | 240 | 0 | 2,33 |
| 100G1 | 2 | 210 | 80 | 1,33 |
| 100G1 | 2 | 219 | 23,5 | 2,00 |
| 100G1 | 3 | 210 | 80 | 1,63 |
| 100G1 | 3 | 219 | 23,5 | 2,75 |
| 100G1 | 3 | 219 | 136,5 | 1,75 |
| 100G1 | 3 | 240 | 0 | 2,88 |
| 100G1 | 3 | 240 | 80 | 6,00 |
| 100G1 | 3 | 240 | 80 | 3,38 |
| 100G1 | 3 | 240 | 80 | 2,00 |
| 100G1 | 3 | 240 | 160 | 4,50 |
| 100G1 | 3 | 261 | 23,5 | 3,00 |
| 100G1 | 3 | 261 | 136,5 | 1,25 |
| 100G1 | 3 | 270 | 80 | 3,00 |
| 100G1 | 4 | 245 | 40 | 5,14 |
| 100G1 | 4 | 234 | 108 | 4,86 |
| 100G1 | 4 | 245 | 80 | 6,00 |
| 100G1 | 4 | 245 | 80 | 6,00 |
| 100G1 | 4 | 245 | 80 | 5,71 |
| 100G1 | 4 | 234 | 52 | 6,00 |
| 100G1 | 4 | 245 | 120 | 4,75 |
| 100G1 | 4 | 256 | 108 | 5,00 |
| 100G1 | 4 | 256 | 52 | 5,25 |
| 100G1 | 4 | 260 | 80 | 5,25 |
| 100G1 | 4 | 230 | 80 | 3,75 |
| 100G1 | 11 | 261 | 167 | 6,64 |
| 100G1 | 11 | 270 | 110 | 6,64 |
| 100G1 | 11 | 240 | 110 | 6,21 |
| 100G1 | 11 | 240 | 110 | 6,50 |
| 100G1 | 11 | 261 | 53 | 4,50 |
| 100G1 | 11 | 210 | 110 | 4,25 |
| 100G1 | 11 | 240 | 190 | 4,00 |
| 100G1 | 11 | 240 | 110 | 5,50 |
| 100G1 | 11 | 219 | 53 | 5,42 |
| 100G1 | 11 | 219 | 167 | 5,25 |
| 100G1 | 11 | 240 | 30 | 6,08 |
| NORMAL | 11 | 240 | 110 | 5,21 |

ta representa un máximo a una temperatura de 244°C, y cantidad de agua de pagado de 86ml, ésta se ubica muy cerca del punto central de los valores experimentales. De las superficies de respuesta para el resto de las características organolépticas, solo muestra significancia (>96%), para el término cuadrático las características acidez organoléptica y amargo representan un máximo. En los otros casos el término cuadrático es poco significativo, y representa un punto de silla para intensidad de aroma, y máximo para aroma de la bebida, y cuerpo.

Tabla 17. Parámetros de las superficies de respuesta calculadas para los experimentos 1, 2, 3, 4 y 11.

| Experimento | 1 | 2 | 3 | 4 | 11 |
|------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| R ² | 0,4064 | 0,8215 | 0,2496 | 0,6145 | 0,4963 |
| Prob>F | | | | | |
| lineal | 0,3766 | 0,2561 | 0,9643 | 0,4201 | 0,4134 |
| Cuadrático | 0,6284 | 0,0514 | 0,5185 | 0,1627 | 0,542 |
| Punto | | | | | |
| Estacionario | Silla | Máximo | Máximo | Máximo | Máximo |
| Temperatura (°C) | 287 | 244 | 243 | 246 | 295 |
| Agua | | | | | |
| Apagado (ml) | 59 | 86 | 54 | 71 | 194 |
| Impresión | | | | | |
| Global | 3,46 | 4,04 | 3,69 | 5,94 | 6,61 |
| Punto Central | | | | | |
| Temperatura (°C) | 270 | 240 | 240 | 245 | 240 |
| Agua | | | | | |
| Apagado (ml) | 80 | 80 | 80 | 80 | 110 |
| IT°C | 60 | 60 | 60 | 30 | 60 |
| IQml | 160 | 160 | 160 | 80 | 160 |

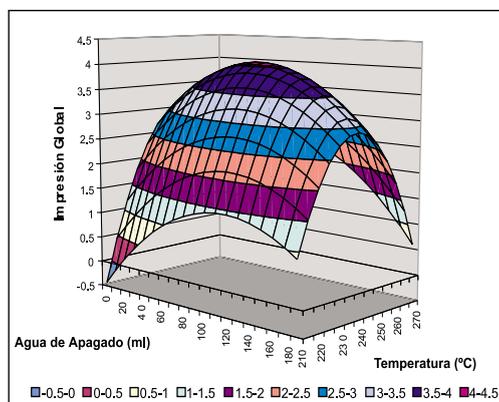


Figura 22. Superficie de respuesta para Impresión Global, Experimento 2.

La Figura 23 muestra la superficie de respuesta teórica para el caso de la acidez organoléptica. Se observa en estas gráficas una tendencia a mayores valores de acidez hacia el punto central. La superficie de respuesta muestra dependencias de la acidez de igual magnitud tanto para el caso de la temperatura, como para el caso del agua de apagado. Al comparar los valores del punto crítico con los correspondientes a la impresión global, se observa una coincidencia en los valores de ambos parámetros (temperatura y agua de apagado). Para este caso, y empleando las mismas técnicas, se analizaron igualmente las variables complementarias mediante la técnica de superficies de respuesta.

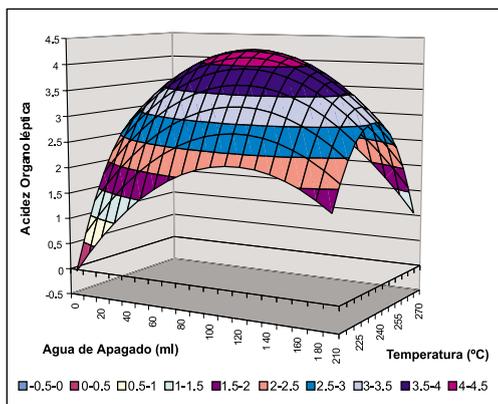


Figura 23. Superficie de respuesta para Acidez Organoléptica, experimento 2.

Densidad del grano tostado, densidad del tostado y molido, e hinchamiento. La Tabla 18 muestra los parámetros de las superficies de respuesta. Se observa que en general los R^2 son altos, e igualmente las probabilidades del término cuadrático excepto para el caso de la densidad del producto tostado y molido. La Figura 24 muestra la superficie de respuesta teórica de la densidad del grano tostado entero; observándose en esta gráfica un punto de silla en 204°C, y 70ml de agua de apagado. Es notorio un aumento de densidad a bajas temperaturas de tostión, como igualmente ha sucedido con las otras materias primas. En este caso es mayor el efecto de la temperatura que del agua de apagado, la cual análogamente a casos anteriores presenta un mínimo esta vez en 70ml. La

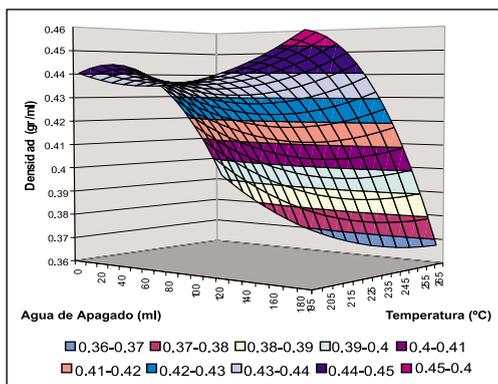


Figura 24. Superficie de respuesta Teórica de Densidad Grano Tostado entero, en el experimento 2.

Tabla 18. Parámetros de las superficies de respuesta para Densidad Grano Tostado Entero, Grano Tostado y Molido, e Hinchamiento correspondiente al experimento 2.

| Característica | Densidad Grano Tostado (g/ml) | Densidad Tostado y Molido (g/ml) | Hinchamiento (%) |
|--------------------|-------------------------------|----------------------------------|------------------|
| R^2 | 0,9824 | 0,8429 | 0,976 |
| Prob>F | | | |
| lineal | 0,003 | 0,1322 | 0,0007 |
| Cuadrático | 0,0235 | 0,3089 | 0,0605 |
| Punto Estacionario | Silla | Silla | Silla |
| Temperatura (°C) | 204 | 222 | 205 |
| Agua Apagado (ml) | 70 | 41 | 115 |
| Valor | 0,436 | 0,43 | 0,38 |

Figura 25 muestra el comportamiento del coeficiente de hinchamiento. Se observa, como en casos anteriores, altos coeficientes a temperaturas altas de tostión independientemente de la cantidad de agua de apagado, lo cual es lógico puesto que las altas temperaturas tienden a producir mayor aumento de volumen del grano y como consecuencia, menor densidad. La superficie de respuesta, representa un punto de silla en el punto (205°C, 115ml) de valor 38%. Se confirman allí los resultados anteriores. Se observa igualmente una fuerte dependencia del coeficiente de hinchamiento con la temperatura, y mucho menos con el agua de apagado, la cual exhibe un máximo.

Humedad del producto tostado y molido.

Los parámetros de superficie de respuesta de la variable humedad (humtost), no presentaron significancia ($R^2=0,5099$, $Pr>f=0,8559$). Como en los casos anteriores, se observan las más altas humedades (2,9% aprox), para los mayores valores de agua de apagado, sin importar la temperatura usada. En general se puede concluir que existe tendencia al aumento de la humedad final de los productos al emplear agua de apagado.

pH, y Acidez titulable. La Tabla 19 muestra los parámetros de pH y acidez titulable. Allí se

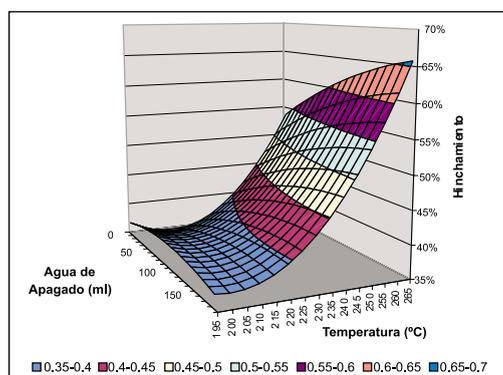


Figura 25. Superficie de respuesta teórica de Coeficiente de Hinchamiento del Grano Entero, en el experimento 2.

observa que, en este caso, muestra significancia estadística la superficie de respuesta correspondiente al pH. Se observa un punto de silla de valor 4,87 a una temperatura de 233°C, y 122ml.

Parámetros de extracción. La Tabla 20 muestra los parámetros de superficie de respuesta encontrados para las variables complementarias, °Brix, sólidos solubles y rendimiento. Se observa alta significancia, alrededor del 98% para todas las variables de extracción. La Figura 26 muestra la superficie de respuesta teórica para °Brix, como en las otras gráficas los “brix” de la bebida exhiben un mínimo con valor de 1,77 para una temperatura de 225°C, y un agua de apagado de 81ml, valores muy parecidos a los exhibidos por el café sano, y la mezcla. Comportamiento análogo muestra la variable relacionada sólidos solubles (Figura 27), la

Tabla 19. Parámetros de las superficies de respuesta para el pH, y la Acidez Titulable del extracto correspondientes al Experimento 2.

| Característica | pH | Acidez Titulable (ml de NaOH 0,01 N) |
|--------------------|--------|--------------------------------------|
| R ² | 0,8599 | 0,7563 |
| Prob>F | | |
| lineal | 0,9071 | 0,1321 |
| Cuadrático | 0,052 | 0,7211 |
| Punto Estacionario | Silla | Silla |
| Temperatura (°C) | 233 | 254 |
| Agua Apagado (ml) | 122 | 63 |
| Valor | 4,87 | 7,4 |

Tabla 20. Parámetros de las superficies de respuesta para los parámetros de extracción de la bebida correspondientes al experimento 2.

| Característica | Brix | Sólidos Solubles (% estufa) | Rendimiento (%) |
|--------------------|--------|-----------------------------|-----------------|
| R ² | 0,9457 | 0,8892 | 0,9231 |
| Prob>F | | | |
| lineal | 0,0098 | 0,1275 | 0,0902 |
| Cuadrático | 0,0119 | 0,0196 | 0,0089 |
| Punto Estacionario | Mínimo | Mínimo | Mínimo |
| Temperatura (°C) | 225 | 225 | 221 |
| Agua Apagado (ml) | 81 | 83 | 80 |
| Valor | 1,77 | 1,23 | 16,5 |

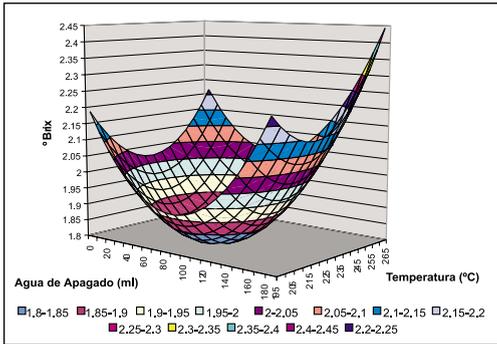


Figura 26. Superficie de respuesta teórica de °Brix de la bebida, en el experimento 2.

cual también exhibe un mínimo en un punto muy próximo (225°C, 83ml), de valor 1,23%. O sea, en este punto se obtienen bebidas menos concentradas. Se observa también que los sólidos solubles tienden a crecer más fuertemente a temperaturas y cantidades de agua de apagado altas, mientras que a temperaturas altas, y cantidades de agua de apagado bajas la concentración de sólidos solubles también aumenta pero en menor proporción. Se observa en este caso más influencia del agua de apagado, que de la temperatura en ambos parámetros.

La Figura 28 muestra la superficie de respuesta teórica correspondiente al rendimiento, la cual igualmente exhibe un valor mínimo, de un valor de 16,5% en (221°C, 80ml). Se observa en esta gráfica, que el valor de rendimiento depende más fuertemente del agua de apagado que de la temperatura. Es interesante notar que mientras la impresión global, en el rango estudiado exhibe un máximo, las variables anteriormente reseñadas exhiben un mínimo, tal y como ocurre para el caso de la mezcla y el producto sano. Adicionalmente, el punto óptimo de prueba de taza está desplazado con respecto al punto mínimo de rendimiento; está a temperaturas y aguas de apagado mayores. Esto sugiere que el punto mínimo de rendimiento no corresponde a las mejores pruebas de taza, y que en general las mejores pruebas de taza exhibirán rendimientos mayores.

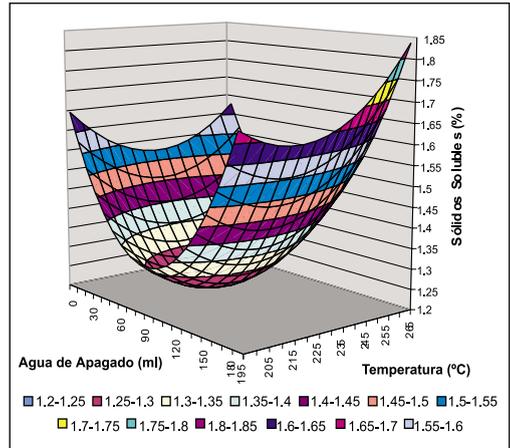


Figura 27. Superficie de respuesta teórica de Sólidos Solubles de la bebida, en el experimento 2.

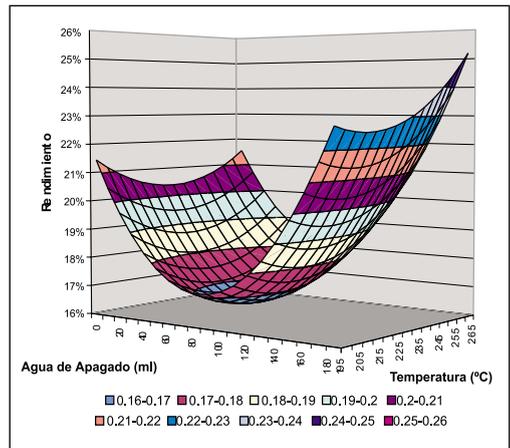


Figura 28. Superficie de respuesta teórica de Rendimiento de Extracción de la bebida, en el experimento 2.

Parámetros granulométricos. Ninguno de los parámetros de superficie presentó significancia.

Con base en todo lo expuesto anteriormente se puede concluir que a lo largo de los 11 experimentos efectuados en los cuales se intentó encontrar expresiones analíticas para todas las variables estudiadas, en función de la temperatura de torrefacción y cantidad de agua

de apagado, se observa que en algunos casos este objetivo se logró, y en otros no, a pesar de que aparentemente se estaba en rangos de variación de las variables independientes que sugerirían la obtención de una expresión analítica. Cabe preguntarse si estas expresiones en última análisis existen o no.

La respuesta parece ser afirmativa, al menos para algunas variables como la impresión global, la acidez organoléptica y el rendimiento. El porqué no siempre se consiguió esta expresión analítica puede deberse a la excesiva sensibilidad del modelo de superficie de respuesta a errores de experimentación, bastante probables en los experimentos anteriores. Basta con que una sola muestra esté levemente sobretostada para que sea mal calificada por el panel de catación, arruinando el experimento respectivo (en todos los puntos excepto en el central se toma una sola repetición).

A pesar de que en general se tuvo mucho cuidado en el proceso de tostión, repitiendo muestras cuando no resultaban con los colores adecuados, algunas muestras, sobre todo en la frontera de color aceptada de todas maneras presentaban algunas calificaciones de quemado.

Adicionalmente, los cafés brocados usados en el presente trabajo, no son en general bien tratados en los beneficiaderos, por considerarlos ya materia prima de mala calidad, y son mal beneficiados, dando en general defectos no atribuibles a brocado, sino a inadecuado beneficio, pero igualmente haciendo difícil la consecución de materia prima adecuada.

Uno de los objetivos de este experimento era comprobar si los productos brocados presentaban diferentes parámetros óptimos de torrefacción, comparados con café sano, en lo que a análisis sensorial se refiere. En primer lugar se tiene que no se encontraron diferencias

significativas en el valor de impresión global entre la mezcla empleada, el producto 100% brocado grado1, y el sano, en condiciones óptimas de torrefacción.

Desde luego todo lo anterior es cierto para la calidad global de los productos empleados en el presente trabajo que fueron calificados entre 5 y 6, en impresión global, que según la escala de calificación empleada por el panel de catación de Cenicafé corresponde a productos de «Calidad media, cualidades tolerables» (12). Desde luego, cabría la pregunta de que hubiera pasado si este comportamiento se hubiera mantenido si el café sano empleado hubiera estado en el rango de calidades 7-9, el cual corresponde según 12 a «Calidad superior. Cualidades deseables».

El café sano empleado en el presente trabajo corresponde en calidad al normalmente empleado por la industria torrefactora nacional para consumo interno.

AGRADECIMIENTOS

Al Panel de Catación de Cenicafé encabezado por la Dra. Gloria Inés Puerta. Al Dr. José Darío Arias, del Programa de Experimentación. Al Dr. Américo Ortiz, Coordinador del Programa de Industrialización, por su colaboración en el diseño del proyecto.

Al Señor Luis Eduardo García, Técnico Electro-Mecánico de la Planta Piloto de Física Técnica. A las Señoritas Gloria Amparo Usma, Claudia Santana, Diana Patricia Giraldo, Diana Maria Rodríguez, Elsa Patricia Henao, Luz Enith Pulgarín, Patricia Viviana Guevara, Patricia Duque, Nancy Patiño, Luz Ayda Quintero, por la selección de los diferentes grados de cafés brocados. A los Señores Héctor Fabio Hernández Ríos, y Darío García Guerrero.

LITERATURA CITADA

1. ACEVEDON, J.L.; CASTAÑO C., J.J. Influencia del agua de apagado sobre las propiedades fisicoquímicas del café tostado. *Cenicafé* 49(1): 17-29. 1998.
2. ALLEN, T. Particle size measurement. Vol. 1. 5. ed. Londres, Chapman & Hall, 1997. 525 p.
3. ALMACAFE. Normas. Santafé de Bogotá, FEDERACAFE, 1988. 29p.
4. CASTAÑO C., J.J. Informe Anual de Labores. 1996-1997. Chinchiná, Cenicafé, 1997. 58p.
5. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS. ICONTEC. Café tostado y molido. Determinación del grado de tostión. Método infrarrojo. Santafé de Bogotá, ICONTEC, 1987. 4p. (Norma NTC2442)
6. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS. ICONTEC. Café tostado y molido. Método para la determinación del tamaño de partícula (Primera actualización), Santafé de Bogotá, ICONTEC, 1996. 7p. (Norma NTC2441)
7. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS. ICONTEC. Café tostado y molido. Método para la determinación de la densidad por compactación. Santafé de Bogotá, ICONTEC, 1997. 4 p. (Norma NTC 4084)
8. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS. ICONTEC. Determinación de la pérdida de masa por secado. Santafé de Bogotá, ICONTEC, 1989. 7 p. (Norma NTC2558)
9. MARTINEZ J.; LOPEZ, L.A. Diseño experimental en la industria química. Santafé de Bogotá, Universidad Nacional de Colombia. 1987. 102p.
10. MONTOYA, E.C. Efecto del daño causado por la broca *Hypothenemus hampei* en la calidad del Café. Chinchiná, Cenicafé, 1994. 18p.
11. POSADAL, R. E. Implementación y estudio del quenching en el torrefactor de la planta piloto de física del LIQC. Santafé de Bogotá, Universidad Nacional de Colombia, 1994. 139p. (Tesis: Ingeniero Químico).
12. PUERTA Q., G.I. Escala para la evaluación de la calidad de la bebida de café variedad *Coffea arabica* procesado por vía húmeda. *Cenicafé* 47(4): 231-234. 1996.
13. PUERTA Q., G.I.; QUICENO, A.L; ZULUAGA, J. La Calidad del café verde, composición, proceso y análisis, Chinchiná, Cenicafé, 1988. 251p.
14. QUANTICK ELECTRONIC INSTRUMENT & CO. Catálogo colorímetro digital QUANTICK IR-800. Santafé de Bogotá, 1993. p.v.
15. SAS INSTITUTE INC. SAS/STAT. Guide for personal computers, version 6. 6. ed. Cary, SAS Institute Inc., 1987. 1028p.