

# CARACTERIZACIÓN GRANULOMÉTRICA DEL CAFÉ COLOMBIANO TOSTADO Y MOLIDO

Ricardo Alonso Guevara-Barreto<sup>\*</sup>; José Jaime Castaño-Castrillón<sup>\*\*</sup>

---

## RESUMEN

**GUEVARA B., R. A.; CASTAÑO C., J. J. Caracterización granulométrica del café colombiano tostado y molido. Cenicafé 56(1):5-18. 2005.**

Mediante el desarrollo de esta investigación se proporcionaron elementos de juicio para determinar las causas de las fallas y mejorar la metodología empleada por la Norma Técnica Colombiana 2441, concerniente al grado de molienda del café. Utilizando la técnica de medición por difracción de rayos láser se encontró que el tamizado recomendado en la Norma, no mide el tamaño real de las partículas cuando éstas se someten a la molienda fina, puesto que se presenta entre otros fenómenos, una obstrucción de los tamices, causada por problemas de limpieza de los mismos, no contemplados en la metodología. Se concluyó, que hace falta especificar un método de toma de la muestra para analizar y adicionar al menos dos tamices al conjunto utilizado. Se demostró que el modelo matemático de Rosin-Rammler, con el cual se ajusta la distribución de partículas, no es el responsable de los problemas de la Norma y por el contrario, su ajuste es aceptable. Adicionalmente, se estudió la influencia de factores como el tipo de café y su grado de tuestión en los resultados de la molienda, hallándose que el tamaño de las partículas producidas es mayor entre mayor es el tamaño de los granos y menor su grado de tuestión.

**Palabras clave:** Granulometría, molienda, café tostado y molido, tuestión.

---

## ABSTRACT

Sound elements to determine the causes of the flaws and to improve the methodology used by the Colombian Norm Technique 2441 concerning the degree of coffee milling were provided by means of this research. Using the measurement technique by laser beams diffraction it was found that the sieving recommended by the Norm does not measure the real size of the particles when they undergo fine milling since, among other phenomena, there is obstruction of the sieves caused by cleaning problems not regarded in the methodology. In conclusion, it is necessary to specify a sampling method to analyze and add at least two sieves to the group used. It was demonstrated that the mathematical model of Rosin-Rammler, with which the particles distribution is adjusted, is not responsible for the Norm's problems, on the contrary, its adjustment is acceptable. Additionally, the influence of factors such as coffee type and its roasting degree in the milling results was studied. Thus, it was found that the bigger the size of the produced particles the bigger the grains size and the lower their roasting degree.

**Keywords:** Grain measurement, milling, toasted and milled coffee, roasting.

---

<sup>1</sup> Fragmento de Tesis "Caracterización granulométrica del café tostado y molido Colombiano", presentada a la Universidad Nacional de Colombia para optar al título de Ingeniero Químico.

<sup>\*</sup> Ingeniero Químico. Universidad Nacional de Colombia.

<sup>\*\*</sup> Investigador Científico II. Programa de Industrialización. Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé, hasta marzo de 2001. Chinchiná, Caldas, Colombia.

El estudio de las propiedades físicas del café tostado y molido no sólo tiene aplicaciones en el manejo, el transporte y el almacenamiento debido a sus características de cohesión y segregación, sino que se ha encontrado, entre otros aspectos, que el tamaño de las partículas tiene una marcada influencia sobre el proceso de preparación de una bebida de café de buenas características organolépticas(4). En la preparación de una bebida se busca extraer los componentes de un lecho granular de café por acción del agua caliente en un tiempo definido de contacto; es así como entre mayor sea el tamaño de las partículas que forman el lecho, menor es el área de contacto entre el agua y el café, y la bebida producida puede resultar clara o subextraída. De igual forma, un lecho compuesto por partículas muy finas presentará una mayor área de contacto y la bebida puede resultar oscura o sobreextraída (13).

Por esta razón, en Colombia, el café tostado y molido se halla clasificado en tres grados de molienda, de acuerdo con la Norma NTC 3534 (9) (Tabla 1). Cada molienda es recomendada para diferentes técnicas de preparación, teniendo en cuenta el tiempo de contacto entre el agua y el café. De esta forma, para métodos de

preparación con tiempos de contacto cortos deben utilizarse partículas finas y para tiempos de contacto largos, partículas más gruesas, como se presenta en las columnas 4 y 5 de la Tabla 1.

En Colombia, la metodología mediante la cual se determinan los parámetros granulométricos de diámetro medio y coeficiente de uniformidad para café tostado y molido, se halla consignada en la Norma Técnica Colombiana NTC 2441 (7) (Tabla 1, columnas 2 y 3). Esta norma tiene por principio separar una muestra de café tostado y molido en porciones, según su tamaño de partícula, utilizando una serie de tamices (1) accionados por un aparato retrogolpeador. La cantidad de café en masa que queda retenido en cada tamiz se relaciona con el total de la muestra analizada y se expresa como porcentaje retenido y porcentaje acumulado. Los valores de abertura del tamiz (diámetro) y los de porcentaje acumulado se aplican a un modelo matemático conocido como ecuación linealizada de Rosin-Rammler <<1>> (1, 7, 15):

$$\ln\left(\ln\left(\frac{100}{\%R}\right)\right) = n\ln(D) + \ln(b) \quad \ll 1 \gg$$

**Tabla 1.** Clasificación de la molienda (9) y métodos recomendados de preparación del café (12).

Molienda	Diámetro medio (µm)	Coefficiente de uniformidad	Preparación	Tiempo (min.)
Gruesa	701-900	> 2,5	Ollas, pistón, percolador	6 - 9
Media	501-700	> 3,0	Colador de tela, filtros de papel, greca, goteo.	4 - 6
Fina	350-500	> 3,8	Expresso doméstico e institucional	0,5 - 4

Después de realizar el ajuste y determinar los valores de  $n$  (coeficiente de uniformidad),  $b$  (constante) y del coeficiente de correlación de la regresión lineal, se calcula el diámetro promedio como el valor en el cual la distribución se parte en su 50%, lo que equivale a calcular una mediana.

No obstante, la NTC 2441 no caracterizaba correctamente el tamaño de la partícula de café tostado y molido, debido a fallas no determinadas; de acuerdo con los estudios realizados en el Comité Icontec 312102 “Café y sus productos”, en el año de 1997 (2, 3, 11).

Esta investigación tuvo como propósito determinar si realmente la NTC 2441 presentaba fallas y en ese caso, proponer soluciones; para lograr este fin, se evaluó el desempeño de la metodología estipulada en dicha norma, en la determinación del tamaño de partícula de café de diversas clases, procesado en diferentes grados de tuestión y de molienda; se comparó la técnica de tamizado con la de difracción de rayos láser y se estudió, entre otros aspectos, el comportamiento del modelo matemático usado para ajustar la distribución obtenida.

## MATERIALES Y MÉTODOS

**Materia prima.** Se utilizó café verde variedad Colombia de tres clases: excelso, consumo y una mezcla del 50% de consumo y pasilla (5, 10); proveniente de la Estación Central Naranjal perteneciente a Cenicafé. Adicionalmente, se utilizó café tostado y molido proporcionado por tres industrias tostadoras de Colombia, el cual fue suministrado por el departamento de Mercado Interno de la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia.

**Localización.** Los procesos de tuestión, molienda y análisis del tamaño de la partí-

cula por tamizado se llevaron a cabo en los laboratorios del programa de Industrialización de Cenicafé y los análisis por difracción de rayos láser, en los laboratorios a los que tiene acceso la compañía Ostos&Ostos en Bogotá.

**Equipos.** Las tuestiones se hicieron en un tostador de tambor diseñado y fabricado en el Laboratorio de Investigaciones de la Química del Café - LIQC, con capacidad para un kilo de café, a una temperatura de 260°C. La determinación del grado de tuestión se hizo con un colorímetro Quantic IR-800, según la NTC 2442 (8). La molienda se realizó en un molino LaSanMarco SM-90, y el análisis por tamizado se efectuó en una máquina Rotap Tyler conforme a la NTC 2441 (7). Para realizar el análisis por difracción de rayos láser se utilizó un equipo CILAS 940 Liquid, y la homogeneidad de las muestras se estableció, previo a su análisis, utilizando un equipo Sieving Riffler de marca Quantachrome.

**Metodología.** Este proyecto se dividió en tres etapas:

Etapa I: Se analizó el comportamiento de la norma con café tipo consumo, tostado hasta grado oscuro y molido en los tres grados de molienda. La molienda se realizó en un molino LaSanMarco SM-90, en 15 grados diferentes de separación de sus discos horizontales o posiciones de la perilla, como se presenta en la Tabla 2.

Para cada grado de molienda se estudiaron cinco posiciones de la perilla (tratamientos), con tres repeticiones. La medida del tamaño de las partículas se efectuó por tamizado según la metodología de la NTC 2441, y por difracción de rayos láser. En total, se analizaron 45 unidades experimentales de 200g de café tostado y molido.

De estas 15 posiciones se seleccionaron tres, en las cuales se obtenían las mejores moliendas gruesa, media y fina, con el fin de ser utilizadas en la etapa II. Por cada grado de molienda se seleccionó aquel tratamiento que presentara las características mostradas en la Tabla 3.

Etapa II: Se probó el comportamiento de la norma para el café tipo excelso, tipo consumo y una mezcla de 50% de tipo consumo y pasilla, los cuales se sometieron a todos los niveles de tosti3n, clara, media, oscura y muy oscura, definidos en la NTC 3534 (9), y se molieron en los tres grados de molienda en las posiciones determinadas en la etapa I. Adicionalmente, se determin3 el influencia de estos factores sobre el tama3o de las part3culas producidas en la molienda.

Por cada grado de molienda se evaluaron 12 tratamientos distribuidos bajo un dise3o completamente al azar con arreglo factorial 3 x 4, tres tipos de caf3 por cuatro grados de

tosti3n. El tama3o de las part3culas se midi3 por tamizado y difracci3n de rayos l3ser.

El efecto de los factores sobre la variable tama3o de la part3cula se determin3 con un an3lisis de varianza y los promedios de los tratamientos se compararon con una prueba m3ltiple de Tukey a un nivel del 5% de probabilidad. Se evalu3 el ajuste de los datos de tamizado a la ecuaci3n de Rosin-Rammler, y el ajuste se consider3 bueno cuando presentaba un R<sup>2</sup> igual o mayor al 95%. Los valores promedio de tama3o encontrados por tamizado y por difracci3n de rayos l3ser para el caso de molienda media se compararon con una prueba de T pareada.

Etapa III: Se analiz3 el caf3 proveniente de tres industrias tostadoras de Colombia, molido en tres molinos diferentes: uno de martillos, uno de discos industrial y otro de rodillos. El caf3 molido en los molinos de martillos y de rodillos se tost3 en un grado medio, y el caf3 molido en el molino de discos se sometió a tosti3n oscura. En total se analizaron siete muestras, ya que cada una de las industrias due3as de los molinos de discos industrial y de rodillos, enviaron las tres muestras de caf3 molido como grueso, medio y fino obtenidas seg3n su criterio.

**Tabla 2.** Descripci3n de los tratamientos de acuerdo al grado de molienda en la etapa I

Molienda	Posici3n Perilla*
Fina	8, 9, 10, 11 y 12
Media	18, 19, 20, 21 y 22
Gruesa	26, 27, 28, 29 y 30

\*La perilla del molino Alitec SM-90 posee 56 divisiones. Entre menor es el valor designado menor es el espacio entre los discos y m3s fina es la molienda.

### Medici3n del tama3o de part3cula

**NTC 2441. T3cnica de tamizado.** La metodolog3a definida en esta norma se sigui3

**Tabla 3.** Criterio de selecci3n del caf3 para cada grado de molienda.

Molienda	Di3metro promedio ( $\mu\text{m}$ )	Coficiente de uniformidad
Fina	425	> 3,8
Media	600	> 3,0
Gruesa	800	> 2,5

paso a paso excepto en la cantidad de café analizado, debido a que se emplearon solamente 50g, según los resultados de estudios realizados por Castaño y Torres (2, 3) . Esta cantidad de café fue obtenida a través de un riguroso muestreo empleando un equipo divisor de polvos Sieving Riffler.

La muestra de café se ubicó en la parte superior de un conjunto de tamices (20, 30, 40, 50, 70 y fondo según la designación ASTM) ensamblados de manera descendente en orden decreciente. En cada tamiz se ubicaron tres cubos de caucho. El tamizado se realizó durante 10 minutos, y con los pesos inicial y final de los tamices se determinó el tamaño promedio de la muestra relacionando la cantidad retenida acumulada de café en cada tamiz con la abertura del mismo, mediante un modelo matemático conocido como ecuación linealizada de Rosin-Rammler.

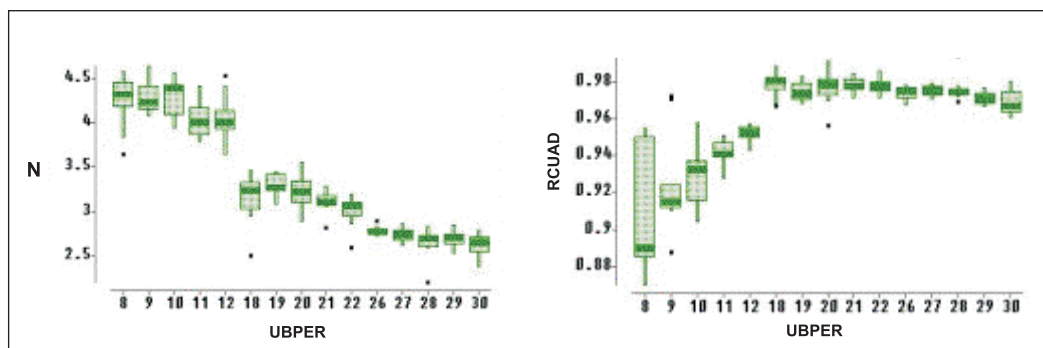
**Técnica de difracción de rayos láser.** Los análisis por la técnica de difracción de rayos láser se realizaron en un equipo Cilas 940 Liquid, siguiendo la metodología recomendada por Guevara (6). Una muestra de 0,2 a 0,5g de café se dispersó en 500ml de isopropanol a temperatura ambiente y se recirculó dentro del equipo por un tiempo mínimo de 40 segundos; en los primeros

20seg se agitó la muestra asegurando la dispersión total de las partículas de café y en los 20seg siguientes, un rayo láser interactuó con las partículas difractándose al paso de las mismas, acción que fue captada por un sensor y finalmente se transformaron los valores en diámetro de partícula, elaborándose la curva de distribución de tamaño del polvo analizado, tanto diferencial como acumulado.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Etapa 1. En la Figura 1 se presentan los valores de promedio de diámetro promedio (DiamRR), coeficiente de uniformidad (n) y coeficiente de correlación al cuadrado ( $R^2$ ), calculados de acuerdo con el ajuste de la ecuación de Rosin-Ramler a los datos obtenidos para las 15 ubicaciones de la perilla (UbPer) evaluadas.

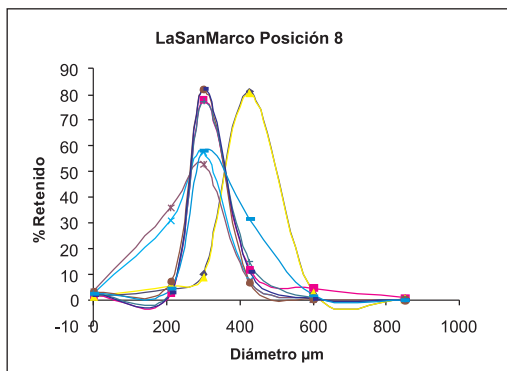
De acuerdo con la metodología de la NTC 2441, las posiciones 8 a la 12 correspondieron a molienda fina; las posiciones 18 a la 22 a molienda media, y las posiciones 26 a la 30 a molienda gruesa. Finalmente, se seleccionaron como molienda fina la posición 11, molienda media la posición 21 y gruesa la posición 28.



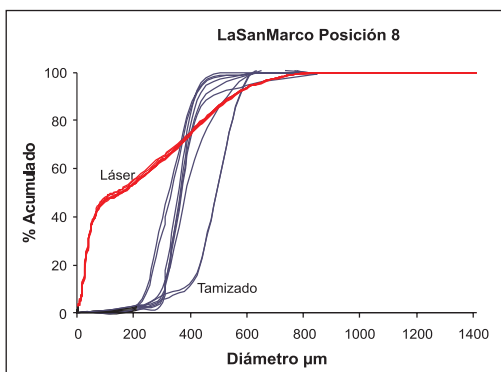
**Figura 1.** Valores promedio de diámetro promedio (DiamRR), coeficiente de uniformidad (n) y coeficiente de correlación al cuadrado ( $R^2$ ), para los tratamientos evaluados en la Etapa I.

**Molienda fina.** El comportamiento típico de las distribuciones diferenciales encontradas por tamizado y las distribuciones acumuladas halladas por tamizado y por difracción de rayos láser, se observan en las Figuras 2 y 3.

Al comparar ambas técnicas, puede observarse cómo el tamizado no detecta una gran cantidad de partículas finas, que en el momento de la extracción en la preparación de una bebida de café pueden tener una gran influencia y, que la técnica de difracción de rayos láser gracias a su amplio rango de medición, si logra detectar (Figura 3).



**Figura 2.** Distribuciones diferenciales para un caso de molienda fina obtenidas por tamizado.



**Figura 3.** Distribuciones acumuladas por tamizado y difracción láser para el caso de la molienda fina.

Esta deficiencia en el tamizado se debe a que las partículas finas presentan una gran adherencia, lo que hace que se aglomeren y que se peguen a los tamices hasta llegar a formar una película que obstruye toda la malla e impide una medición adecuada.

En la Figura 4, pueden observarse de manera clara los fenómenos de adhesión y obstrucción.

El fenómeno de obstrucción se debe al aceite presente en el café tostado y molido, el cual es liberado durante el proceso de tostación y a los problemas de limpieza de los tamices (Figura 4). Esta obstrucción acarrea consigo otras deficiencias, una de



**Figura 4.** Fenómenos de adhesión y obstrucción ocurridos durante el proceso de tamizado, especialmente, de café fino.

ellas es la gran variabilidad de los resultados para esta molienda (Figuras 2 y 3), esto se debe a que la obstrucción no es siempre igual y algunas veces se adhiere mayor cantidad de café a los tamices. Otra falla tiene que ver con el comportamiento del modelo matemático de Rosin-Rammler para la molienda, el cual presenta un  $R^2$  del 95%, debido a que la obstrucción ocurre generalmente, en el tamiz 50 ( $300\mu\text{m}$ ), y muy poco café se ubica en el tamiz 70 ( $212\mu\text{m}$ ) y en el fondo, por tanto, se produce en la curva de la distribución por porcentaje acumulado un fuerte ascenso en el valor de  $300\mu\text{m}$ , situación que el modelo matemático no es capaz de ajustar apropiadamente (Figura 5). La falta de precisión en el ajuste

del modelo matemático de Rosin-Rammler lleva a caracterizar esta molienda con valores por encima de  $430\mu\text{m}$ , cuando en realidad se agrupa en valores entre  $250$  y  $380\mu\text{m}$ , en otras palabras, se esta clasificando esta molienda como fina cuando realmente se halla por debajo de ese rango.

**Molienda media y gruesa.** El comportamiento típico de los resultados encontrados para estas clases de molienda se presenta en las Figuras 6 a la 9. Las distribuciones diferenciales encontradas por tamizado se observan en las Figuras 6 y 7, mientras que en las Figuras 8 y 9, se encuentran las distribuciones acumuladas halladas por tamizado y por difracción de rayos láser.

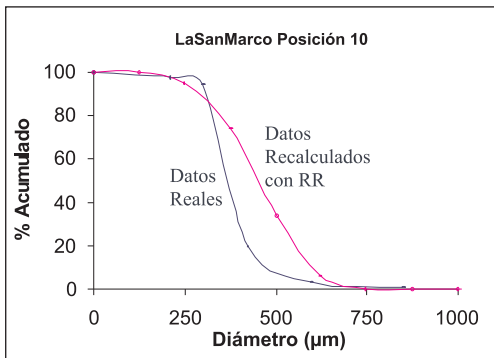


Figura 5. Deficiencia del ajuste del modelo matemático para molienda fina (Molino LaSanMarco, posición 10).

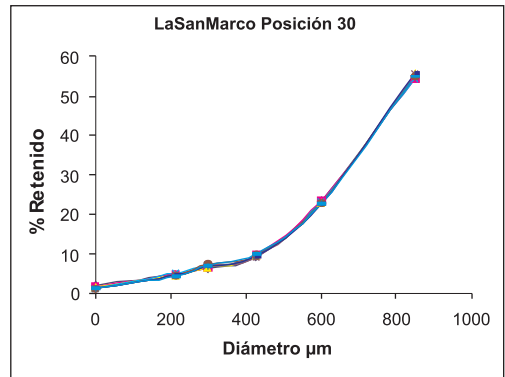


Figura 7. Distribuciones por porcentaje retenido para un caso de molienda gruesa obtenida por tamizado.

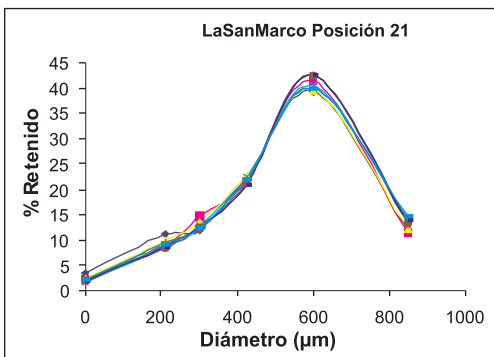


Figura 6. Distribuciones por porcentaje retenido para un caso de molienda media obtenida por tamizado.

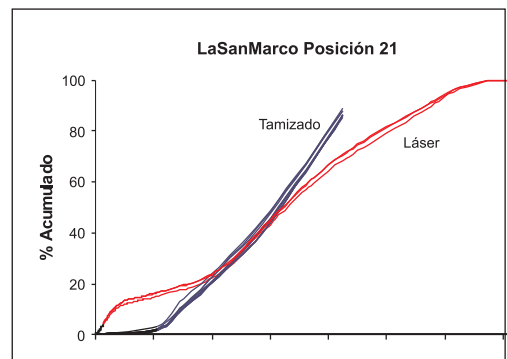
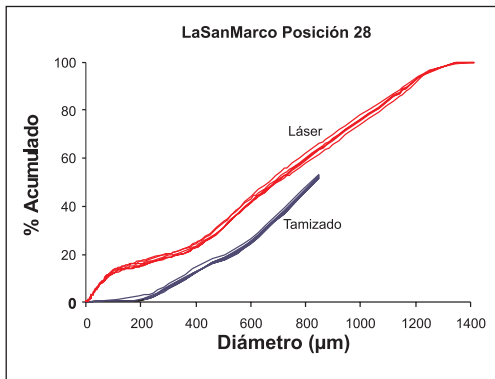


Figura 8. Distribuciones acumuladas por tamizado y difracción láser para un caso de molienda media.



**Figura 9. Distribuciones acumuladas por tamizado y difracción láser para un caso de molienda gruesa.**

Para estas moliendas se observó una buena reproducibilidad. Vale la pena mencionar que en los datos obtenidos antes del presente estudio se observaba poca reproducibilidad, incluso para las moliendas gruesa y media; esto deja de manifiesto que en la metodología de la NTC 2441 hace falta especificar un método de muestreo, con el cual se unifique la forma en la cual se seleccionen muestras representativas a partir de una masa de café, sin que el fenómeno de segregación de las partículas se convierta en un error en la medición.

Aunque en el café de molienda media y gruesa también se hallan presentes partículas finas, y se observa su adherencia a los tamices, no hubo obstrucción en los tamices 50 y 70 como en el caso de la molienda fina. Esto permite interpretar que la obstrucción es mayor en tanto mayor es la cantidad de café que pasa sobre estas mallas, lo que lleva a pensar que al disminuir la cantidad de muestra analizada en la NTC 2441 disminuye la ocurrencia de este fenómeno.

Como muestran las gráficas de porcentaje de café retenido para estas moliendas, la distribución de tamaños de la partícula no alcanza a ser cubierta en su totalidad por

los tamices empleados en la NTC 2441, y tan solo cubren hasta un 85 y un 60% de la distribución, como se observa en las gráficas de porcentaje acumulado para las moliendas media y gruesa, respectivamente. Este hecho demuestra que a la norma le hacen falta uno o dos tamices más, para que se logre medir la distribución de tamaños de la partícula en su totalidad o al menos, que el tamiz de mayor abertura no retenga más del 6% de la distribución como lo recomienda la teoría (14).

**Etapa II.** En la Tabla 4 se presentan los valores promedio de los diámetros calculados por el modelo de Rosin-Rammler para tamizado y los valores de la mediana calculados por la técnica de difracción.

En general, el comportamiento de la metodología empleada por la NTC 2441 en estas moliendas fue bueno, siendo el  $R^2$  de la regresión de Rosin-Rammler mayor del 97%.

**El fenómeno de obstrucción.** Una vez más, como en la etapa I, se observó una gran variabilidad en los resultados para la molienda fina; este fenómeno está relacionado con los problemas de adhesión y de obstrucción a los tamices.

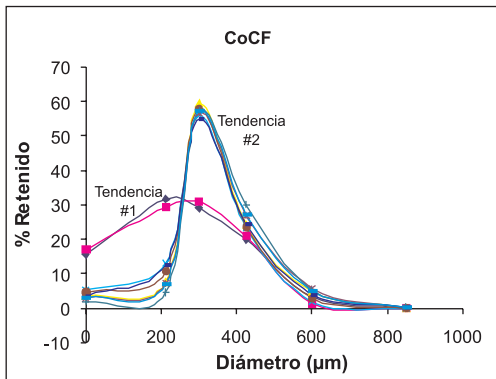
Para discutir el fenómeno de obstrucción es importante analizar lo ocurrido con el tratamiento para el café tipo consumo de tostación clara y molienda fina (CoCF). Para este tratamiento las curvas de distribución granulométrica por porcentaje retenido (Figura 10), muestran dos tendencias muy diferentes. La primera, señalada en la gráfica como tendencia #1, corresponde a la medición de este tratamiento por tamizado utilizando tamices totalmente limpios, después de haber sido lavados con agua y un jabón de pH básico, debido a que los jabones ácidos reducen el diámetro de los alambres de la malla (14).



**Tabla 4.** Valores promedio de diámetros por tamizado y difracción láser para cada tratamiento

Tratamiento*	Diámetro tamizado (µm)	Diámetro láser (µm)	Tratamiento	Diámetro tamizado (µm)	Diámetro láser (µm)	Tratamiento	Diámetro tamizado (µm)	Diámetro láser (µm)
CoCF	409,44	271,31	CoCM	611,18	610,76	CoCG	906,76	615,83
CoMF	398,24	242,72	CoMM	608,49	593,54	CoMG	872,93	617,76
CoOF	431,46	181,70	CoOM	586,43	566,77	CoOG	809,97	599,24
CoSF	396,00	114,13	CoSM	575,85	524,05	CoSG	774,68	566,90
ExCF	423,22	310,33	ExCM	622,42	632,61	ExCG	889,61	643,68
ExMF	394,37	292,29	ExMM	612,83	617,54	ExMG	884,16	648,31
ExOF	397,49	197,67	ExOM	596,57	602,40	ExOG	856,22	613,45
ExSF	408,47	156,08	ExSM	583,71	570,75	ExSG	799,09	573,63
MeCF	378,50	294,68	MeCM	606,85	612,10	MeCG	880,98	650,51
MeMF	433,34	243,41	MeMM	598,14	602,83	MeMG	857,10	617,04
MeOF	438,23	207,04	MeOM	588,20	587,59	MeOG	813,66	627,35
MeSF	413,41	177,83	MeSM	572,40	566,21	MeSG	770,94	No

\* En el nombre de los tratamientos las dos primeras letras equivalen al tipo de café excelso (Ex), Consumo (Co), y Mezcla 50% Consumo-Pasilla (Me); la tercera letra al grado de tostión Clara (C), Media (M), Oscura (O) y Muy Oscura (S) y la cuarta letra al grado de molienda Gruesa (G), Media (M) y Fina (F).



**Figura 10.** Tratamiento de café tipo consumo con tostación clara y molienda fina (CoCF). Etapa II.

El resto de las curvas denominadas tendencia #2, equivalen al resultado del mismo análisis pero usando tamices que se limpiaron con aire a presión y un cepillo.

Durante el desarrollo de esta investigación, después de cada análisis por tamizado, los tamices se limpiaron con aire a presión y un cepillo de cerdas semiduras, para retirar todas las partículas adheridas al tamiz y

para que éste se viera limpio. Siguiendo las recomendaciones anotadas en el catálogo Tyler (14), periódicamente los tamices se lavaron con agua y con un jabón suave de carácter básico y, posteriormente, se secaron en una estufa a 105°C durante 2 horas. No se consideró en ningún momento que esa limpieza tuviera algo que ver con la medición, puesto que al usar aire comprimido al final el tamiz se vio limpio; sin embargo, cada vez que los tamices se usaron después de haber sido lavados se observaba que las partículas pasaban más cómodamente y no se formaba obstrucción en la molienda fina, excepto para el café tostado oscuro y muy oscuro, en donde a pesar de la máxima limpieza de los tamices se formaban obstrucciones. Por tanto, la causa de la obstrucción es la presencia de aceite en el café tostado y molido (4), el cual es liberado en el momento de la tostación y que impregna los tamices. Además, no puede retirarse de éstos con aire ni con el cepillo, sino únicamente cuando se lavan con agua y un jabón básico.

En la NTC 2441 no se hace referencia a la forma en que deben limpiarse los tamices una vez realizada la medición, y como se observa, éste es un factor importante para el buen desempeño de la misma, vale la pena entonces que en la norma se defina un metodología de limpieza de los tamices.

Los valores del diámetro medio, el coeficiente de uniformidad (n) y el coeficiente de correlación al cuadrado (R<sup>2</sup>) del ajuste de la ecuación de Rosin-Rammler para las nueve mediciones del tratamiento de café tipo consumo de tostación clara y molienda fina se presentan en la Tabla 5. Es importante destacar que las curvas denominadas tendencia #1 corresponden a las mediciones

1 y 2, las cuales presentaron un R<sup>2</sup> de 99%, lo que indica que no es el modelo matemático el que no ajusta los datos de molienda fina, sino que es el método de tamizado el que no logra determinarla por los problemas de adhesión y obstrucción, antes mencionados.

Influencia del tipo de café y su grado de tostación en el tamaño de las partículas producidas en la molienda. Los datos de molienda media fueron sometidos a un análisis de varianza (Tabla 6), para determinar la influencia de los factores: tipo de café y grado de tostación, en el tamaño de las partículas producidas en la molienda, este análisis no se aplicó a las moliendas fina

**Tabla 5.** Características de diámetro y parámetros de la ecuación de Rosin-Rammler para la muestra de café tipo consumo de tostación clara y molienda fina.

Medición	Diámetro (µm)	Indice de uniformidad (n)	Coefficiente de determinación (R <sup>2</sup> )
1	332,53	2,65	0,99
2	325,39	2,68	0,99
3	432,87	3,90	0,96
4	404,49	3,65	0,97
5	439,09	4,09	0,97
6	415,11	3,74	0,97
7	463,37	4,30	0,95
8	424,28	3,71	0,96
9	447,80	3,95	0,95

**Tabla 6.** Análisis de varianza de los tratamientos de molienda media en la etapa II.

Factor de variación	Grados libertad	Cuadrado medio	P > F
Modelo	11	2.247	0,000
Tostación	3	7.133	0,000
Tipo de café	2	1.459	0,000
Tipo café x tostación	6	67,31	0,310
Error	96	55,80	
R <sup>2</sup>	0,8219		

y gruesa debido a los problemas de poca reproducibilidad y falta de cobertura de la distribución, respectivamente.

La variable tamaño de partícula no tuvo respuesta significativa al efecto de la interacción tipo de café y grado de tuestión, pero sí a estos factores de manera individual (Tablas 7 y 8). Los promedios de los tratamientos se encuentran en la Figura 11.

El café excelso, por ser más grande y resistente produce partículas de mayor tamaño que los otros tipos de café evaluados en las mismas condiciones de tuestión y molienda. Así mismo, moler dos muestras de café

tostado uno sin defectos y otro hasta con el 21% de ellos (10), no genera diferencias en el tamaño de las partículas producidas. Pero entre mayor sea el grado de tuestión, más quebradizo es el café y menor es el tamaño de las partículas producidas en la molienda. El café producido en la molienda es mayor entre mayor es el tamaño de las partículas de entrada a la operación y menor su grado de tuestión. Esto permite hacer la observación de que debe tenerse precaución en el manejo de las condiciones de molienda para café de diferentes características.

**Comportamiento de la metodología de la Norma Técnica Colombiana 2441.** Al

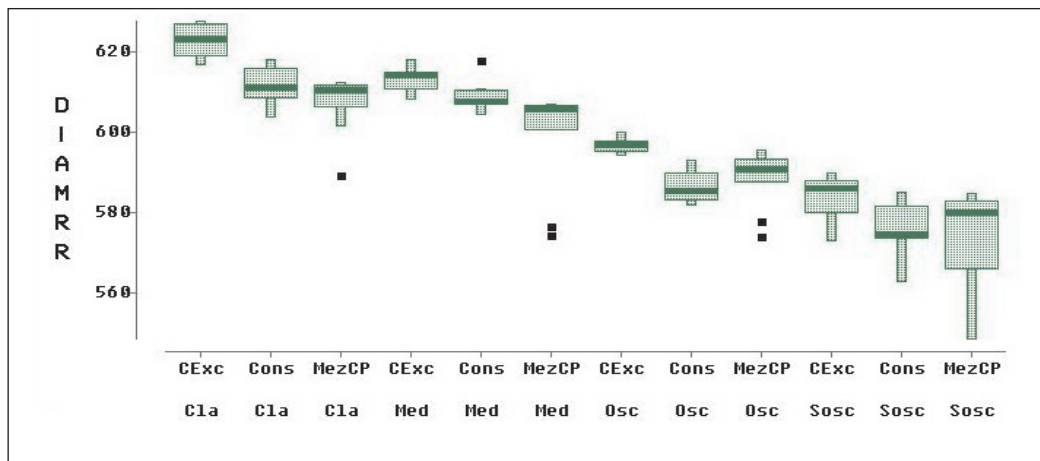


Figura 11. Valores de promedio de diámetro por tamizado para los tratamientos de molienda media.

Tabla 7. Efecto de los grados de tuestión evaluados en la molienda media del café en la etapa II.

Tuestión	Grupos de Tukey
Clara	A*
Media	B
Oscura	C
Muy oscura	D

\*Valores identificados con letras diferentes indican diferencia estadística según la prueba múltiple de Tukey al 5%.

Tabla 8. Efecto de los tipos de cafés evaluados para molienda media en la etapa II.

Tipo de café	Grupos de Tukey
Excelso	A*
Consumo	B
50% Consumo-pasilla	B

\*Valores identificados con letras diferentes indican diferencia estadística según la prueba múltiple de Tukey al 5%.

igual que en la etapa I, se observó una buena reproducibilidad en las mediciones para la molienda gruesa y media, pero las distribuciones de tamaño no alcanzan a ser medidas en su totalidad, esto demuestra nuevamente que los tamices utilizados en la NTC 2441 no son suficientes para cubrir la distribución. La molienda fina presentó una baja reproducibilidad debida a los problemas de adhesión y obstrucción ya discutidos.

El modelo matemático de Rosin-Rammler demostró su capacidad de ajustar correctamente, con  $R^2$  mayores del 97%, para las moliendas gruesa y media. Para el caso de molienda fina el ajuste fue menor del 95% en todos los casos, pero se demostró, que no es un problema del modelo matemático sino de los fenómenos de obstrucción y adhesión en la técnica de tamizado.

**Tamizado versus difracción de rayos láser.**

En la Tabla 9 se presentan los resultados de la prueba T, calculada a partir de los valores medios de diámetro encontrados para el tamizado y la difracción láser para la molienda media. Este análisis no se aplicó a las moliendas fina y gruesa debido a los problemas encontrados en la técnica de tamizado como fueron: la poca reproducibilidad y la falta de cobertura de la distribución, respectivamente.

El resultado muestra que no existe diferencia significativa entre los valores medios hallados por ambas técnicas; sin embargo, es importante destacar que la tecnología láser permite medir una gran cantidad de partículas

finas que el método de tamizado no logra determinar, hecho que puede apreciarse en las Figuras 3, 8 y 9.

La Tecnología de difracción de rayos láser permite obtener la distribución real del tamaño de las partículas obtenidas al moler el café tostado.

Etapa III. Los valores promedio de diámetro, coeficiente de uniformidad (n) y coeficiente de correlación al cuadrado ( $R^2$ ) de los análisis por tamizado para cada uno de los molinos analizados en la molienda establecida a criterio de la industria que lo suministró, se presentan en la Tabla 10.

Los resultados permiten observar cómo las muestras que fueron enviadas por las industrias como gruesa y media poseen diámetros promedio mucho menores al rango definido para esas moliendas en la NTC 3534. Es importante destacar que los valores para el coeficiente de uniformidad en casi todos los casos estuvieron por debajo del nivel designado en la norma NTC 3534, esto demuestra que estos molinos no están produciendo moliendas con la uniformidad recomendada y que deben ser ajustados, especialmente, el molino de rodillos. Además, esto indica que las industrias tostadoras analizadas manejan unas definiciones de molienda gruesa, media y fina, distintas a las recomendadas en la NTC 3534.

Para la moliendas definidas como finas e incluso para la molienda media obtenida en el molino de discos, ocurrió obstrucción

**Tabla 9.** Prueba de T para los diámetros medios hallados por tamizado y difracción láser

Variable Analizada: Diff = Diámetro láser – Diámetro tamizado			
Media	Error estándar	T	Prob > T
6,326	4,946	1,279	0,2272

de los tamices con las respectivas repercusiones que ya fueron mencionadas en las etapas I y II.

Finalmente, puede concluirse que en la determinación granulométrica de café tostado y molido, la técnica de tamizado caracteriza adecuadamente las moliendas gruesa y media, presentando una buena reproducibilidad cuando la muestra se selecciona apropiadamente.

La metodología empleada en la NTC 2441, no permite medir el tamaño real de las partículas de café molido a nivel fino, debido a que las partículas se adhieren a los tamices e incluso llegan a obstruirlos. Estos fenómenos de adhesión y obstrucción se deben a que los aceites producidos durante la tostación del café y que se hallan presentes en el café tostado y molido, se impregnan en los tamices con una película invisible que no se desprende con aire a presión y, sólo puede quitarse lavando los tamices con agua y un jabón básico. La limpieza de los tamices antes de realizar una medición es un factor importante y por tanto, es apropiado que en la NTC 2441 se haga mención a este aspecto.

En el proceso de tamizado del café tostado y molido la obstrucción de los tamices se

incrementa y entre mayor es la cantidad de café que pasa sobre las mallas 50 y 70, por lo que para contribuir a la solución de este problema puede disminuirse la cantidad de muestra y por ende la cantidad de café que pasará sobre estas mallas será menor.

También es necesario especificar en la NTC 2441 un método de muestreo mediante el cual se unifique la forma de tomar una muestra a partir de una masa de café, para que no se incurra en errores producidos por el efecto de segregación del café.

El modelo matemático de Rosin-Rammler, presenta un buen desempeño en los casos de molienda gruesa y media. Pero, para el caso de molienda fina el comportamiento del modelo no es aceptable, no obstante se encontró que el problema no es del modelo sino de la técnica de tamizado, debido a que cuando no se presenta el fenómeno de obstrucción, la ecuación de Rosin-Rammler ajusta bien la distribución.

El tamaño de las partículas producidas en la molienda es mayor entre mayor es el tamaño del café tostado utilizado en la operación y menor es su grado de tostión. Tostar y moler dos muestras de café verde

**Tabla 10.** Valores promedio del diámetro, el coeficiente de uniformidad y el coeficiente de correlación al cuadrado, para los molinos analizados etapa III.

Molino	Diámetro (µm)	Coficiente de uniformidad (n)	Coficiente de correlación al cuadrado (R2)
Martillos	453,21	2,78	0,9361
Rodillos Gruesa	633,09	1,87	0,9545
Rodillos Media	437,31	2,40	0,9449
Rodillos Fina	365,95	2,09	0,9651
Discos Gruesa	569,10	2,59	0,9811
Discos Media	489,75	3,14	0,9949
Discos Fina	412,66	3,13	0,9850

con el mismo tamaño uno sin defectos y el otro hasta con el 21% de ellos según la NTC 3633, no tiene diferencia en cuanto al tamaño de las partículas producidas en la operación de molienda.

El número de tamices utilizado por la norma no es suficiente para cubrir de manera completa o por lo menos, en un 90% la distribución de tamaños de partícula, principalmente en el caso de molienda gruesa, y por tanto, es necesario que en la NTC 2441 se adicionen por lo menos dos tamices más con una abertura mayor a la del tamiz 20 (850 $\mu$ m).

## AGRADECIMIENTOS

Los autores manifiestan su agradecimiento a la Dra. Lucelly Orozco Gallego, al Ing. Luis Ignacio Rodríguez V., a la Dra. Irma Milena Mayorga, y a la Compañía Ostos&Ostos en especial al Ingeniero Marco Uriel Ostos

## LITERATURA CITADA

1. ALLEN, T. Particle size measurement. 5. ed. London, Chapman and Hall, 1997. 2 Vols. (Powder Technology Series).
2. CASTAÑO C., J. J.; TORRES, M. L. Dependencia de los parámetros granulométricos, con el peso y el tiempo de tamizado. Chinchiná, Cenicafé, 1997. 20 p.
3. CASTAÑO C., J.J.; TORRES, M.L. Dependencia de los parámetros granulométricos, del peso empleado para tamizado. Chinchiná, Cenicafé, 1997. 26 p.
4. CLARK, R. J.; MACRAE, R. Coffee: Technology. London, Elsevier Applied Science, 1987. 321 p.
5. FEDERACIÓN NACIONAL DE CAFETEROS – FNC. BOGOTÁ. COLOMBIA. Café. Normas sobre la calidad del café. Bogotá, FNC, 1988. 4 p.
6. GUEVARA B., R. A. Caracterización granulométrica del café tostado y molido colombiano. Manizales, Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería y Arquitectura, 2000. 131 p. (Tesis: Ingeniero Químico).
7. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS - ICONTEC. BOGOTÁ. COLOMBIA. Café tostado y molido. Método para la determinación del tamaño de partícula. Bogotá, ICONTEC, 1996. 7 p (Norma Técnica Colombiana NTC No. 2441).
8. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS - ICONTEC. BOGOTÁ. COLOMBIA. Café tostado y molido. Determinación del grado de tostión. Método Infrarrojo. Bogotá, ICONTEC, 1988. 2 p (Norma Técnica Colombiana NTC No. 2442).
9. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS - ICONTEC. BOGOTÁ. COLOMBIA. Café tostado y molido. Bogotá, ICONTEC, 1998. 7 p (Norma Técnica Colombiana NTC No. 3534).
10. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS - ICONTEC. BOGOTÁ. COLOMBIA. Café pasilla. Bogotá, ICONTEC, 1999. 7 p (Norma Técnica Colombiana NTC No. 3633)
11. LEÓN, R. Propuesta para la designación del grado de molienda del café colombiano con fines normativos. Bogotá, Corporación Tecnológica de Bogotá, 1997, p.v.
12. PELÁEZ R., A.; MORENO G., E. Vademecum del tostador colombiano. Bogotá, LIQC, 1995, p.v.
13. ROTHFOS, B. Coffee consumption. Hambourg, Gordian-Max Riech, 1986. 472 p.
14. TYLER. Testing Sieves and their uses. Estados Unidos, Tyler. 1989. 53 p. (Handbook 53).
15. VIAN, A.; OCON, J. Elementos de ingeniería química: operaciones básicas. 5. ed. Madrid, Aguilar, 1976. 812 p.