

Universidad de Costa Rica.
Facultad de Ingeniería.
Escuela de Ingeniería Agrícola.
Trabajo Final de Graduación.

Análisis comparativo de la medición del contenido de humedad con los medidores “de las marcas” DICKEY-John, Gehaka, Motomco y Grainman en frijol nacional rojo variedad Cabécar y negro variedad Guaymí.

Informe de Trabajo Final de Graduación presentado a la Facultad de Ingeniería como requisito para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Agrícola.

Pedro Mauricio Guerrero Brenes.

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio.
Mayo de 2011

Tesis para ser presentada en la en la Facultad de Ingeniería como requisito para optar el grado de Licenciatura en Ingeniería Agrícola.

Ing. Alberto Miranda Chacón

Director de tesis

M.Sc. Ramiro Alizaga López

Lector

Ing. Marianela Alfaro Santamaría

Lector

Ing. Geovanni Carmona Villalobos

Miembro tribunal

Ing. Johanna Chanto Ballesteros

Miembro tribunal

Ing. Pedro Mauricio Guerrero Brenes

Sustentante

RECONOCIMIENTOS

Quiero agradecer a todos los compañeros de la Escuela de Ingeniería Agrícola, Oscar, Sergio, Juan Carlos, Felipe, Nickolls, Guillermo, Gilbert, Ronald y demás que compartieron tantos años conmigo en la Universidad. En especial a Johanna compañera y amiga que estuvo apoyándome en todo momento. También a los compañeros de trabajo del CINA, en especial a mi gran amigo Adrian, quien siempre estuvo a mi lado en buenos momentos y en otros difíciles. Quiero agradecer a los compañeros de trabajo del Consejo Nacional de Producción, en especial al Área de Control de Calidad Agrícola por todo el apoyo que me dieron durante el trabajo. Agradezco profundamente la colaboración del Ing Alberto Miranda, Inga. Marianela Alfaro, M.Sc. Ramiro Alizaga y Ing. Geovanni Carmona por las recomendaciones hechas a lo largo del trabajo y las cuales fueron muy importantes. Agradezco el apoyo de mis hermanos Braulio Guerrero y Diego Guerrero que me han acompañado toda la vida. A mis primos Milagro Guerrero y Jericó Guerrero, por todo su apoyo que me han brindado.

DEDICATORIA

A Dios por ayudarme a seguir adelante, pese a los obstáculos.

A mi familia.

A mis padres y abuelos que siempre estarán presentes.

RESUMEN

En este trabajo se realizó una comparación de equipos indirectos de medición de contenido de humedad con las marcas DICKEY-John, Gehaka, Motomco y Grainman, para frijol nacional rojo variedad Cabécar y negro variedad Guaymí con respecto al horno de convección forzada como método estándar de referencia. Para ello se efectuó un muestreo en las principales zonas productoras de frijol de la zona sur del país, recolectando muestras con altos contenidos de humedad, para luego secarlas en una secadora estática de laboratorio y obtener diferentes puntos de contenido de humedad.

Con los contenidos de humedad obtenidos se realizó un análisis comparativo utilizando como referencia normas internacionales¹, las cuales tienen tolerancias y parámetros que deben cumplir este tipo de medidores para una adecuada operación.

Para frijol rojo Cabécar en el parámetro de precisión con respecto al horno solo el Gehaka cumple con la tolerancia definida. En el parámetro repetibilidad para un mismo equipo todos medidores cumplen los requerimientos mínimos, sus mediciones entre sí son estables. En reproducibilidad entre equipos, ninguno cumple con los requerimientos mínimos.

Para frijol negro Guaymi en el parámetro de precisión con respecto al horno ningún medidor está dentro de la tolerancia. En el parámetro de repetibilidad para un mismo equipo todos cumplen los requerimientos mínimos de tolerancia, sus mediciones entre sí son estables. En el caso de reproducibilidad entre equipos ninguno cumple con los requerimientos mínimos de tolerancia.

Dando como resultado diferencias significativas entre la variedad Cabécar con respecto a la variedad Guaymi para los medidores utilizados.

¹ Organización Internacional de Metrología Legal (OIML R59-2006), Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST Handbook 44 – 2008).

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
ÍNDICE DE TABLAS.....	x
ÍNDICE DE GRAFICOS.....	xiii
CAPITULO 1.Introducción	1
1.1 Generalidades.....	1
1.2 Justificación.....	3
CAPITULO 2. Objetivos.	4
2.1 Objetivo general.....	4
2.2 Objetivos específicos.....	4
CAPITULO 3. Nota teórica..	5
3.1 Frijol.....	5
3.1.1 Variedades que se cultivan en Costa Rica.....	6
3.1.2 Características del agua en el grano.....	6
3.2 Contenido de humedad.....	7
3.3 Reducción del contenido de humedad.....	8
3.4.Secado capa delgada.....	9
3.5 Sistema de secado.....	9
3.6 Medición del contenido de humedad.....	11
3.6.1 Mediciones directas del contenido de humedad.....	11
3.6.2 Mediciones indirectas del contenido de humedad.....	11
3.6.3 Dispositivos con el principio de capacitancia.....	12
3.6.3.1 Algunos conceptos fundamentales de medidores por capacitancia.....	12
3.7 Normas internacionales.....	14

CAPITULO 4. Metodología.	19
4.1 Muestreo.....	19
4.2 Equipos utilizados.....	21
4.3 Procedimiento para bajar el contenido de humedad al grano.....	21
CAPÍTULO 5: Resultados y Discusión.....	23
5.1 Generalidades.....	23
5.2 Resultados para frijol Rojo de la variedad Cabécar.....	23
5.3. Resultados con los gráficos de mediciones del contenido de humedad y recta de mejor ajuste para cada medidor para frijol rojo.....	29
5.4 Análisis con las norma OIML R59 para el frijol rojo.....	38
5.5 Resultados para frijol Negro de la variedad Guaymi.....	40
5.6 Resultados con los gráficos de mediciones del contenido de humedad y recta de mejor ajuste para cada medidor para frijol negro.....	45
5.7 Análisis con las norma OIML R59 para el frijol negro.....	54
5.8 Comparación de resultados entre ambas variedades de frijol.....	56
CAPÍTULO 6: Consideraciones finales y recomendaciones.....	58
6.1 Consideraciones finales.....	58
6.2 Fuentes de error.....	59
6.3 Recomendaciones.....	60
CAPÍTULO 7. BIBLIOGRAFÍA.....	62
7.1 Artículos de revistas.....	62
7.2 Libros.....	62
7.3 Páginas wed.....	63

CAPÍTULO 8. ANEXOS.....	65
8.1 ANEXO A. Contenidos de humedad obtenida.....	66
8.1.1 Contenidos de humedad para frijol rojo Cabécar.....	67
8.1.2 Contenidos de humedad para frijol negro Guaymí.....	69
8.2 ANEXO B. Gráficos de contenido de humedad.....	71
8.2.1 Gráficos de contenido de humedad para frijol rojo Cabécar.....	72
8.2.2 Gráficos de contenido de humedad para frijol negro Guaymí.....	74
8.3 ANEXO C. Metodología para cada medidor de contenido de humedad.....	77
8.3.1 Medidor Dickey-John GAC® 2100.....	78
8.3.2 Medidor Gehaka G919.....	79
8.3.3 Medidor Motomco 919.....	80
8.3.4 Medidor Grainman 919	81
8.4 ANEXO D. Análisis de datos atípicos.....	82
8.4.1 Selección de datos anómalos.....	83
8.4.2 Resultados para frijol rojo variedad Cabécar.....	84
8.4.3 Resultados para frijol negro variedad Guaymí.....	87
8.4.4 Consideraciones finales.....	90

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de la secadora.....	10
Figura 2. Esquema de un condensador de placas simples.....	12
Figura 3. Esquema de un condensador con el grano como dieléctrico.....	13
Figura 4. Errores máximos permitidos NIST	16
Figura 5. Zonas de muestreo.....	20
Figura 6. Muestreo por región.....	20
Figura 7. Muestreo de un solo saco.....	20
Figura 10. Medidor Dickey-John GAC® 2100.....	78
Figura 11 Medidor Gehaka G919-Agri.....	79
Figura 12. Medidor Motomco919.....	80
Figura 13. Medidor Grainman 919.....	81

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Máximo error permisible según OIML R59.....	15
Tabla 2. Requerimientos en precisión, repetitividad y reproducibilidad según OIMLR59.....	18
Tabla 3. Contenido de humedad C.H. (%) para frijol rojo Cabécar.....	24
Tabla 4. Ajustes matemáticos para el grafico de C.H. (%) obtenidos en el Dickey-John para frijol rojo.....	30
Tabla 4.1 Ajustes matemáticos para el grafico de C.H. (%) obtenidos en el Dickey-John para frijol rojo (área Sombreada).....	31
Tabla 5 Ajustes matemáticos para el grafico de C.H. (%) obtenidos en el Grainman para frijol rojo.....	32
Tabla 5.1 Ajustes matemáticos para el grafico de C.H. (%) obtenidos en el Grainman para frijol rojo (área Sombreada).....	33
Tabla 6 Ajustes matemáticos para el grafico de C.H. (%) obtenidos en el Gehaka para frijol rojo.....	34
Tabla 6.1 Ajustes matemáticos para el grafico de C.H. (%) obtenidos en el Gehaka para frijol rojo (área Sombreada).....	35
Tabla 7. Ajustes matemáticos para el grafico de C.H. (%) obtenidos en el Motomco para frijol rojo.....	36
Tabla 7.1 Ajustes matemáticos para el grafico de C.H. (%) obtenidos en el Motomco para frijol rojo. (Área Sombreada).....	37
Tabla 8. Parámetros según MEP para frijol rojo.....	38
Tabla 9. Resultados en precisión en cada equipo en frijol rojo.....	38
Tabla 10. Resultados en repetibilidad en cada equipo en frijol rojo.....	39
Tabla 11. Resultados en reproducibilidad en cada equipo en frijol rojo.....	39
Tabla 12. Contenido de humedad C.H. (%) para frijol negro.....	40

Tabla 13 Ajustes matemáticos para el grafico de C.H (%) obtenidos en el Dickey-John para frijol negro.....	46
Tabla 13.1 Ajustes matemáticos para el grafico de C.H (%) obtenidos en el Dickey-John para frijol negro área Sombreada).....	47
Tabla 14. Ajustes matemáticos para el grafico de C.H (%) obtenidos en el Grainman para frijol negro.....	48
Tabla 14.1 Ajustes matemáticos para el grafico de C.H (%) obtenidos en el Grainman para frijol negro (área Sombreada).....	49
Tabla 15 Ajustes matemáticos para el grafico de C.H (%) obtenidos en el Gehaka para frijol negro.....	50
Tabla 15.1 Ajustes matemáticos para el grafico de C.H (%) obtenidos en el Gehaka para frijol negro (área Sombreada).....	51
Tabla 16 Ajustes matemáticos para el grafico de C.H (%) obtenidos en el Motomco para frijol negro	52
Tabla 17. Parámetros según MEP para frijol negro.....	54
Tabla 18. Resultados en precisión en cada equipo en frijol negro.....	54
Tabla 19 Resultados en repetibilidad en cada equipo en frijol negro.....	55
Tabla 20.Resultados en reproducibilidad en cada equipo en frijol negro.....	55
Tabla 21. Intervalos de C.H a cada 1 % de contenido de humedad..... (Frijol rojo).	67
Tabla 22. Diferencias C.H (%) entre métodos..... (Frijol rojo)	68
Tabla 23. Intervalos de C.H a cada 1 % de contenido de humedad..... (Frijol negro).	69
Tabla 24. Diferencias C.H (%) entre métodos..... (Frijol negro).	70

Tabla 25. Valores críticos de Q teóricos.....	84
Tabla 26. Contenido de humedad para frijol rojo Cabécar (datos anómalos).....	85
Tabla 27. Precisión \bar{Y} y SDD obtenidos	86
Tabla 28. Reproducibilidad SDD1 obtenidos	86
Tabla 29. Contenido de humedad para frijol negro Guaymí (datos anómalos).....	87
Tabla 30. Precisión \bar{Y} y SDD obtenidos	88
Tabla 31. Reproducibilidad SDD1 obtenidos	89

ÍNDICE DE GRAFICOS

Grafico 1. Histograma C.H (%) para frijol rojo	25
Grafico 2. Diferencias del medidor Dickey John para frijol rojo.....	26
Grafico 3. Diferencias del medidor Grainman para frijol rojo.....	27
Grafico 4. Diferencias del medidor Gehaka para frijol rojo.....	28
Grafico 5. Diferencias del medidor Motomco para frijol.....	29
Grafico 6. Grafico C.H (%) con el Dickey John para frijol rojo.....	30
Grafico 6.1. Grafico C.H (%) con el Dickey John para frijol rojo.....	31
(Área sombreada).	
Grafico 7. Grafico C.H (%) con el Grainman para frijol rojo.....	32
Grafico 7.1. Grafico C.H (%) con el Grainman para frijol rojo.....	33
(Área sombreada).	
Grafico 8. Grafico C.H (%) con el Gehaka para frijol rojo.....	34
Grafico 8.1. Grafico C.H (%) con el Gehaka para frijol rojo.....	35
(Área sombreada).	
Grafico 9. Grafico C.H (%) con el Motomco para frijol rojo.....	36
Grafico 9.1. Grafico C.H (%) con el Motomco para frijol rojo.....	37
(Área sombreada).	
Grafico 10. Histograma C.H (%) para frijol negro.....	41
Grafico 11. Diferencias del medidor Dickey John para frijol negro.....	42
Grafico 12. Diferencias del medidor Grainman para frijol negro.....	43
Grafico 13. Diferencias del medidor Gehaka para frijol negro.....	44

Grafico 14. Diferencias del medidor Motomco para frijol negro.....	45
Grafico 15. Grafico C.H (%) con el Dickey John para frijol negro.....	46
Grafico 15.1. Grafico C.H (%) con el Dickey John para frijol negro.....	47
(Área sombreada).	
Grafico 16. Grafico C.H (%) con el Grainman para frijol negro.....	48
Grafico 16.1. Grafico C.H (%) con el Grainman para frijol negro.....	49
(Área sombreada).	
Grafico 17. Grafico C.H (%) con el Gehaka para frijol negro.....	50
Grafico 17.1. Grafico C.H (%) con el Gehaka para frijol negro.....	51
(Área sombreada).	
Grafico 18. Grafico C.H (%) con el Motomco para frijol negro.....	52
Grafico 18.1. Grafico C.H (%) con el Motomco para frijol negro.....	53
(Área sombreada).	
Grafico 19. Diferencias C.H (%) de los medidores en función de las tolerancias a lo largo de cada contenido de humedad obtenido.....	72
(Frijol rojo).	
Grafico 20. Diferencias C.H (%) entre horno y el Dickey John Gac2100 para frijol negro Cabécar.....	72
Grafico 21. Diferencias C.H (%) entre horno y el Grainman para frijol rojo Cabécar.....	73
Grafico 22. Diferencias C.H (%) entre horno y el Gehaka para frijol rojo Cabécar.....	73
Grafico 23. Diferencias C.H (%) entre horno y el Motomco para frijol rojo Cabécar.....	74

Grafico 24. Diferencias C.H (%) de los medidores en función de las tolerancias a lo largo de cada contenido de humedad obtenido.....	74
(Frijol negro).	
Grafico 25. Diferencias C.H (%) entre horno y el Dickey John Gac2100 para frijol negro.....	75
Grafico 26. Diferencias C.H (%) entre horno y el Grainman para frijol negro.....	75
Grafico 27. Diferencias C.H (%) entre horno y el Gehaka para frijol negro.....	76
Grafico 28. Diferencias C.H (%) entre horno y el Motomco para frijol negro.....	76

CAPÍTULO 1: Introducción

1.1 Generalidades.

El frijol es uno de los principales granos básicos que se consumen en el país, sin embargo en los últimos años ha aumentado considerablemente su importación principalmente de China, Argentina y Nicaragua, ya que se ha dejado de producir en el país cada vez más, debido principalmente a los costos más elevados de producción para los productores nacionales que no pueden competir con el grano extranjero (Datos CNP).

Con la problemática de disponibilidad de alimentos en el mundo, es necesario que el país cultive lo que consume dentro de lo posible, lo cual aumenta la necesidad de un adecuado manejo pos cosecha del grano, uno de los factores de calidad más importantes a tomar en cuenta es el manejo del contenido de humedad.

Existe una problemática alrededor del uso de equipos de medición del contenido de humedad en granos, debido a que estos equipos han sido calibrados por los fabricantes para granos con propiedades físicas de otras regiones no necesariamente iguales a las del país, esto causa inexactitud en las mediciones de contenido de humedad (Alizaga, 1981), con lo cual se pueden tener inconvenientes tales como:

- Otorgar a un lote de grano un valor equivocado, estimado con base en el contenido de humedad.
- Identificación de pérdidas en el control de inventario.
- Secamiento excesivo: Implica un costo adicional del secado en sí y causa una disminución en el peso del lote de grano.
- Secamiento incompleto: Es una de las causas importante del deterioro de los granos durante el almacenamiento.
- Infestación de hongos e insectos, que afectan la calidad del grano lo cual lo hacen no apto para el consumo humano o animal.

Es importante tomar en cuenta factores que afectan el contenido de humedad de los granos tales como la temperatura del mismo, el efecto de la masa, el contenido de impurezas, la uniformidad y la presencia de granos rotos (Martínez, 2006) en el momento de realizar la medición de contenido de humedad. Por lo anterior muchos equipos modernos, las muestras deben operarse sin impurezas y a temperatura normalmente a 25 °C para hacer las mediciones y reducir el efecto de estos factores.

En investigaciones previas en Costa Rica se ha logrado comparar entre equipos indirectos y el Horno de convección forzada. Ramiro Alizaga en 1981 comparó el Motomco 919 y el horno para muestras de frijol, maíz, arroz en granza y sorgo. Encontró que para arroz en granza, con baja y alta humedad el Motomco proporciona siempre valores de humedad menores que los obtenidos con el horno. Específicamente en el grano de frijol nacional encontró que medidor el Motomco proporcionó lecturas de 1,2% y 1,7% superiores al contenido real de contenido de humedad entre los puntos de 13% y 20% C.H.

Beatriz Mazón (2007) seco café pergamino, café oro y arroz en granza en una secadora estática de laboratorio hasta obtener muestras con diferentes niveles de contenido de humedad. Posteriormente al secado, determinó los contenidos de humedad empleando tres equipos de medición indirecta (Seedburo digital, Dickey John y SINAR), además de una balanza analizadora de humedad A&D.

En arroz en granza, café oro y café pergamino se obtuvieron diferencias inferiores en contenido de humedad con el Seedburo 1200 en comparación con el SINAR. En arroz en granza estas diferencias entre el método de referencia y el Dickey John fueron similares a las del horno y el Seedburo. De los cuatro equipos evaluados, la balanza A&D presentó las menores diferencias con respecto al horno en todos los productos. Ambos investigadores hicieron análisis de regresión para obtener curvas de mejor ajuste y ecuaciones de la misma.

1.2 Justificación.

En este contexto, por la importancia comercial que implica el contenido de humedad del grano, es de gran interés a nivel nacional realizar un estudio comparativo de los medidores del contenido de humedad, con respecto a un método de referencia como el horno de convección forzada, para granos tales como el frijol que es parte de la dieta costarricense, utilizando para ello recomendaciones de normas internacionales que dictan parámetros de aceptabilidad para que los equipos trabajen dentro de una tolerancia permitida. Lo cual permite la mejora en la operación de este tipo de equipos, a nivel de instituciones oficiales que tiene injerencia en la verificación de la calidad de los granos, como es el caso del Centro para Investigaciones en Granos y Semillas de la Universidad de Costa Rica (CIGRAS) y el Consejo Nacional de la Producción (CNP), en el Laboratorio de Control de Calidad Agrícola, cuya área posee los equipos utilizados en el estudio, en donde los resultados en pruebas en calidad de granos son importantes en toma de decisiones.

CAPÍTULO 2: Objetivos.

2.1 Objetivo general.

Comparar los resultados de medición de contenido de humedad empleando equipos de medición indirectos, tales como: DICKEY-John GAC® 2100, Gehaka 919, Motomco 919, Grainman, en frijol nacional rojo variedad Cabécar y negro variedad Guaymí con respecto al horno de convección forzada como método estándar de referencia.

2.2 Objetivos específicos.

- Determinar el efecto de la variedad de frijol en la determinación de contenido de humedad en equipos indirectos.
- Generar una curva comparativa de contenido de humedad para el medidor Motomco 919 con respecto al horno de convección forzada como método estándar de referencia.
- Generar una curva comparativa de contenido de humedad para el medidor Gehaka 919 con respecto al horno de convección forzada como método estándar de referencia.
- Generar una curva comparativa de contenido de humedad para el medidor DICKEY-John GAC® 2100 con respecto al horno de convección forzada como método estándar de referencia.
- Generar una curva comparativa de contenido de humedad para el medidor Grainman con respecto al horno de convección forzada como método estándar de referencia.
- Hacer un análisis comparativo entre los medidores de contenido de humedad utilizando las normas OIML- R59 de la Organización Internacional de Metrología Mundial (OIML, 2006) y NIST Handbook-44 del Instituto Nacional de Estándares y Tecnología de los Estados Unidos (NIST, 2008), con criterios de homologación de parámetros y tolerancias para este tipo de equipos.

CAPÍTULO 3: Nota teórica.

3.1 Frijol.

El frijol (*Phaseolus vulgaris*) pertenece a la familia de las leguminosas; se conoce como frijol al conjunto de granos procedentes de cualquier variedad (cultivar). El frijol es una fuente importante de proteínas, calorías y otros nutrientes presentes en los granos, y es uno de los tres granos básicos de máximo consumo en la dieta del costarricense (FAO, 2006).

En un estudio realizado en el 2006 por la FAO–CNP–MAG indica que la producción nacional de frijol es de 10 mil TM año, sembrada en cerca de 10 a 12 mil hectáreas. Esta producción ha disminuido a una tasa media de -9,1% anual entre el 2000 y el 2005, a razón de unas 1,800 hectáreas al año. Las principales zonas de siembra son las regiones Huetar Norte y Brunca, con 67% y 22% de la producción total, respectivamente.

Desde 1995, la producción nacional de frijol ha disminuido drásticamente. La razón principal de esta disminución radica en que el Estado costarricense implementó políticas de libre comercio, entre las cuales están el eliminar las compras de ciertos productos agrícolas (FAO, 2006).

Según datos del CNP, la producción nacional de frijol está caracterizada por una marcada estacionalidad de la salida de la cosecha en Agosto y Setiembre para frijol invernal mayormente en la zona Sur, entre Enero y Abril para frijol veranero en la zona Sur y Norte. La estacionalidad y concentración geográfica de la cosecha, confieren particular relevancia a aspectos relacionados con el abastecimiento del mercado y el manejo de los inventarios físicos del grano.

3.1.1 Variedades que se cultivan en Costa Rica.

Variedades de grano negro

Las principales variedades de frijol rojo que se cultivan en el país son: Brunca, UCR 55, Guaymí.

Guaymí: Es una planta arbustiva y semi-erecta, posee hábito de crecimiento tipo indeterminado arbustivo, con buena ramificación y producción de gran variedad de vainas. Florece a los 38 días y la maduración ocurre a los 68 días; su ciclo de vida es de 76 días. Esta Variedad proviene del programa de mejoramiento genético que busca resistencia a la mustia hilachosa del frijol, causada por *Rhizoctonia solani* Kuhn². Esta variedad procede de la línea MUS 106 y fue liberada oficialmente en 1996 (Hernández y Araya, 2007).

Variedades de grano rojo

Las principales variedades de frijol negro que se cultivan en el país son: Chirripó Rojo, Bribí, Telire, Gibre, Curré, Changena, Tonjibe, Cabécar.

Cabécar: Fue liberada en el 2003 y evaluada durante cuatro años (bajo el código EAP 9510-77) debido a su potencial de rendimiento, resiste a enfermedades y posee caracteres agronómicos (adaptabilidad y arquitectura). Su ciclo vegetativo varía entre 72 y 75 días, la floración inicia entre los 35 y 39 días, la madurez fisiológica ocurre entre los 6 y 68 días.

3.1.2 Características del agua en el grano.

Los granos son organismos biocoloidales constituidos por proteínas, carbohidratos, grasas, lípidos, sales y agua. En ellos pueden diferenciarse dos formas de agua: Agua de constitución y agua adsorbida (Alizaga, 1981).

Agua de constitución: El agua de constitución se encuentra combinada en enlaces químicos con los compuestos que forman la materia seca, en especial proteínas y carbohidratos de al-

² Estado asexual de *Thanatephorus cucumeris* Frank (Donk).

to peso molecular, es parte constituyente del grano y solo se puede remover bajo condiciones rigurosas.

Agua adsorbida: El agua adsorbida está estrechamente ligada entre sí y con las moléculas del material adsorbente; sus moléculas interactúan con las del grano por lo que las propiedades de una sustancia influyen las de otra. En este caso se involucran fuerzas eléctricas de adsorción del tipo polar y las fuerzas Van Der Waals (Alizaga, 1981). Además, el agua desempeña un papel importante en la adsorción, pues su molécula posee un gran momento dipolar por unidad de superficie, razón por lo cual es fuertemente adsorbida por compuestos polares.

Agua Libre: En los granos, el agua libre es retenida débilmente por fuerzas de capilaridad y de tensión superficial. Posee propiedades normales del agua libre y las moléculas del material adsorbente solo sirven de soporte. Este tipo de agua es muy superficial, ocupa los poros, espacios intergranulares y puede concentrarse en estado líquido y gaseoso.

En realidad lo que existe en el grano es agua con todos los grados de fijación posible entre la totalmente libre y la composición química.

3.2 Contenido de humedad (c.h.)

Es el total de cantidad de agua presente en una determinada materia. Los productos de origen orgánico se definen para fines científicos como materiales que constan de materia seca y agua.

El contenido de humedad se expresa bien en fracción decimal o bien en porcentaje, en una de las dos formas siguientes:

Referido al producto húmedo (C.H.). El contenido de humedad se define como la proporción del peso del agua con respecto al peso total de la materia seca y el agua. Es el método más comúnmente usado en agricultura.

$$\text{C.H.} = \frac{W_w}{W_T} \times 100 \quad (1)$$

Donde:

C.H: Contenido de humedad base humedad.

Ww: Peso agua.

Wt: Peso total muestra.

Referido al producto seco (c.h.). El contenido de humedad se define como la proporción del peso del agua con respecto al peso de la materia seca. Este método se utiliza normalmente en los trabajos de laboratorios científicos.

$$\text{c.h.} = \frac{W_w}{W_{m.s.}} \times 100 \quad (2)$$

Donde:

c.h: Contenido de humedad base seca

Ww: Peso agua.

Wt: Peso muestra seca.

3.3 Reducción del contenido de humedad.

Según Henderson es la remoción a un contenido de humedad tal que la disminución en calidad debido a moho, acción enzimática e insectos es despreciable.

El índice de actividad metabólica disminuye notablemente en la mayoría de los cereales, si el contenido de humedad del grano se reduce a 14 por ciento, y cesa prácticamente con una humedad inferior a 8 por ciento. El secado es un tratamiento normal de los cereales húmedos antes del almacenamiento. El secado requiere de energía para evaporar la humedad y corriente de aire para desplazar el vapor de agua resultante.

3.4 Secado de capa delgada

La capa delgada se caracteriza por ser no mayor a un espesor a 2,5 cm, donde la masa de aire seco pasa a través de la capa y su contenido de humedad disminuye de forma uniforme, ya que el grano en toda la capa está sujeto a una distribución homogénea (Thompson, 1968). Además el uso de una secadora estática de arroz permite la reducción lenta, pero homogénea de la muestra, lo cual contribuye a obtener valores de humedad más confiables.

En este trabajo no se profundizó en el balance de energía del secado y las características psicométricas del mismo, porque el enfoque se dirige a la medición el contenido de humedad en los equipos, teniendo cuidado de que el secado sea gradual y homogéneo.

3.5 Información correspondiente al sistema de secado.

Se tomó el área de la sección transversal del secador, altura de cada una de las capas de grano y caudal de aire suministrado por el ventilador. Para la determinación del caudal de aire se tomó los valores correspondientes a la velocidad media del aire -utilizando un anemómetro y al área de la sección a través de la cual fluye, correspondiente a la descarga del ventilador en el plenum. El caudal de aire en $\text{m}^3 \text{min}^{-1}$ se determina mediante la ecuación 3.

$$Q = V \times A \quad (3)$$

Donde:

Q-caudal de aire de secado, $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$.

V - velocidad del aire, m s^{-1} .

A - área perpendicular al flujo de aire, m^2 .

Secadora a Utilizar: La secadora utilizada está constituida por un ventilador que mueve el aire y que lo fuerza a pasar por la masa de granos, una resistencia entre el ventilador y la capa que permite aumentar la temperatura del aire de secado.

Teniendo las siguientes características propias de la secadora y el ambiente, (Ver figura 1).

T1: 25 °C, H.R1: 70- 85%.

T2: 45 °C, H.R.2: 45 %.

Caudal de secado aproximado Q_{prom} : 0,032 m³/s,

Velocidad del aire aproximado V: 0,659, m s⁻¹,

Área perpendicular al flujo de aire A: 0,049 m².

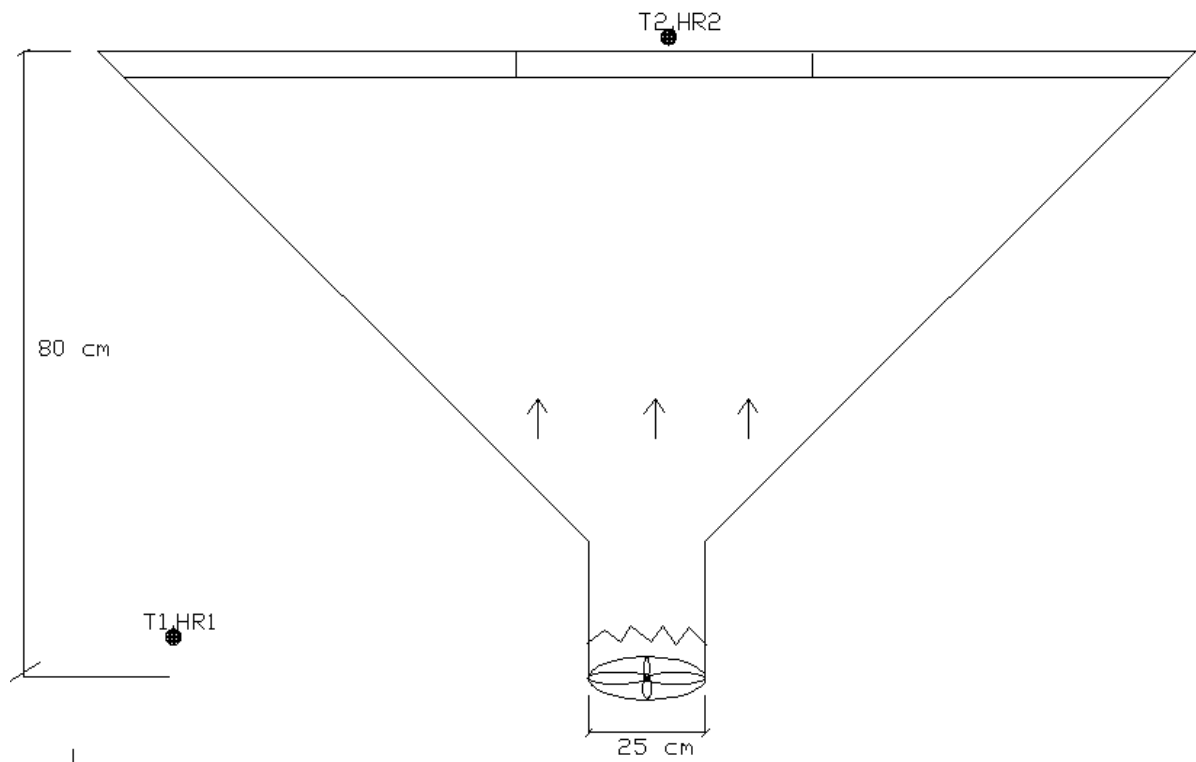


Figura 1. Esquema de la secadora.

Fuente: elaboración propia.

3.6 Medición del contenido de humedad.

Los métodos de medición del contenido de humedad se dividen en dos categorías: mediciones directas y mediciones indirectas (Mazón, 2007).

3.6.1 Mediciones directas del contenido de humedad

Para las mediciones directas, la muestra se divide en submuestras, y cada una de ellas se trata en sucesión. El contenido de humedad se determina pesando una submuestra y eliminando luego el agua y volviendo a pesar la muestra seca (la diferencia de peso equivale al agua contenida inicialmente), o bien recogiendo y pesando o midiendo el agua extraída. El método más común es el primero; el agua de la muestra se elimina calentándola en un horno en condiciones controladas. Se obtiene luego el promedio del contenido de humedad de las sub-muestras.

Método de secado al horno: Se pesa el material, se seca luego en un horno a una temperatura determinada y durante un tiempo determinado y se vuelve a pesar. Se supone que el peso perdido corresponde al agua contenida en el producto original. Para evitar errores se utiliza un formulario normalizado para registrar los pesos medidos.

El horno de secado debe estar ventilado con un ventilador y su temperatura debe ser ajustable y controlable a ± 1 °C en el rango de 95 °C a 135°C.

3.6.2 Mediciones indirectas del contenido de humedad

Los métodos indirectos para determinar el contenido de humedad consisten en medir una propiedad del grano relacionada con el mismo. Las dos propiedades más comunes son la resistencia eléctrica y la constante dieléctrica de una muestra de grano que se ha pesado en una cámara de medición conforme a un procedimiento normalizado. De este modo se ase-

gura la utilización de cantidades uniformes de grano y la aplicación de presiones uniformes sobre la muestra.

3.6.3 Medición del contenido de humedad por capacitancia.

El principio de capacitancia en su forma más simple, se puede describir como un condensador que se compone de dos cargas opuestas como placas conductoras separadas por un aislante llamado dieléctrico. La región o espacio entre las placas es ocupado por un campo eléctrico. Un condensador de placas paralelas simple se representa esquemáticamente de la la Figura 2, con una fuente de alimentación de corriente alterna. Otras formas de condensador, más usadas son los cilindros concéntricos (Agrichem Inc, 1997).

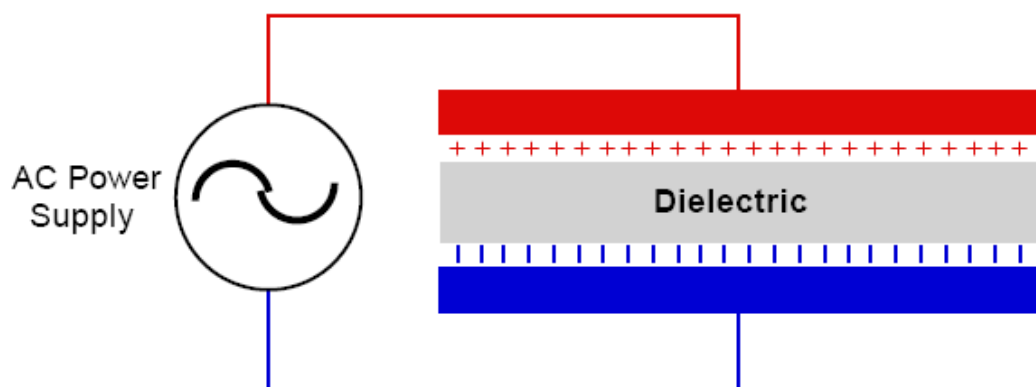


Figura 2. Esquema de un condensador de placas simples

Fuente: Boletín de AgriChem, Inc

3.6.3.1 Algunos conceptos fundamentales de medidores por capacitancia

Un condensador es un dispositivo que puede sostener o almacenar una carga eléctrica, que es su "capacidad". Para un condensador de placas simples, la capacitancia se define por la siguiente ecuación:

$$C = \frac{KA}{4\pi d} \quad (4)$$

Donde:

C: Capacitancia

K: Constante Dieléctrica

A: Área superficial de las placas

d : Distancia entre las placas

A medida que la capacidad dieléctrica del grano es mayor implica que tiene un K con una constante más grande, por lo cual se necesita más energía de la red eléctrica para cargar las placas del condensador.

Un condensador como monitor de humedad: la conversión de un condensador en un sensor de humedad del grano es teóricamente simple, el grano que se prueba se coloca entre las placas del condensador el dieléctrico (Agrichem Inc, 1997), que se ilustra esquemáticamente en la Figura 3.

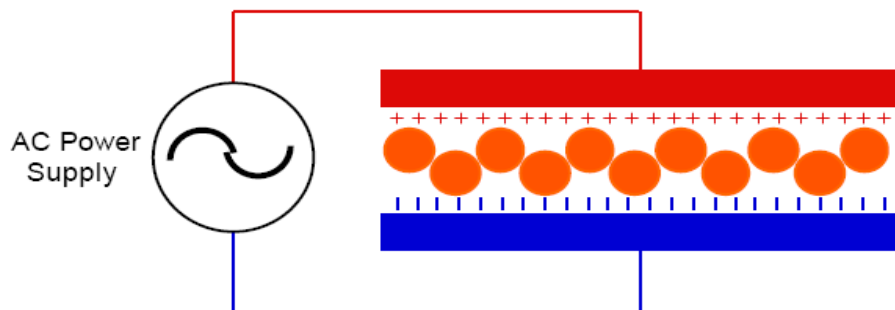


Figura 3. Esquema de un condensador de placas simples con el grano como dieléctrico

Fuente Boletín de AgriChem, Inc

Las constantes dieléctricas de los granos han sido experimentalmente determinada, y varían en un rango entre 2 y 3.

3.7 Normas internacionales para Verificación de Medidores de humedad.

- OIML R59. “Medidores de humedad de grano de cereales y oleaginosas”. Organización Internacional de Metrología Legal.
- NIST Handbook 44 - 2008 “Las especificaciones, tolerancias y otros requisitos técnicos para el pesaje y medición de los dispositivos”. Estados Unidos. Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST) EE.UU.
- ISO 7700: ISO 7700 / 1: “Comprobación de la calibración de medidores de humedad de los cereales”.

La Organización Internacional de Metrología Legal (OIML) emitió una recomendación conocida como OIML R59, refiriéndose sobre los tipos de medidores que pueden ser usados en operaciones comerciales, de acuerdo con las tolerancias de los medidores. La última versión fue hecha en el 2006.

Al igual que la OIML R59, la NIST utiliza las mismas tolerancias para trabajar con los equipos de medición de contenido de humedad, en el documento NIST Handbook 44 – 2008 se pueden apreciar estos parámetros.

Estas normas clasifican los granos en dos grupos, según el tipo de grano (ver tabla 1), Grupo I (Maíz, arroz, sorgo y girasol) y Grupo II: (demás cereales y oleaginosas), cada uno con su Máximo Error Permisible (MEP) respectivo, el cual es la suma de todos los factores que afectan la medición del contenido humedad que son condensadas un solo valor para poder trabajar con las pruebas de homologación de dichas normas.

Dichos parámetros que afectan la medición son variedad, densidad, impurezas, clima y composición química.

El frijol rojo y negro se ubica dentro del grupo II, de modo que su Máximo Error Permissible es 0,7% entre los puntos de 6 a 18 % C.H. y aumenta por arriba del 18% según la operación matemática : $0,04 \times C.H.$

Tabla 1. Máximo error permisible para uso de equipos de medición de contenido de humedad.

Máximo error permisible (MEP)		
Índice	Tipo de grano o semilla	MEP en porcentaje de contenido de humedad (C.H.)
I	Maíz, arroz, sorgo y girasol	Si $0,05 \times C.H. < 0,8$ entonces MEP: 0,8; de lo contrario MEP : $0,05 \times C.H.$
II	Cereales y oleaginosas	Si $0,04 \times C.H. < 0,7$ entonces MEP : 0,7; de lo contrario MEP : $0,04 \times C.H.$

Fuente: OIML- R59

La norma de la NIST, utiliza las mismas tolerancias que la OIML recomienda; en el figura 4 se puede apreciar cómo se presentan las diferencias de cada equipo dentro de un gráfico de control, para visualizar si los puntos están fuera y dentro de la tolerancia de medición.

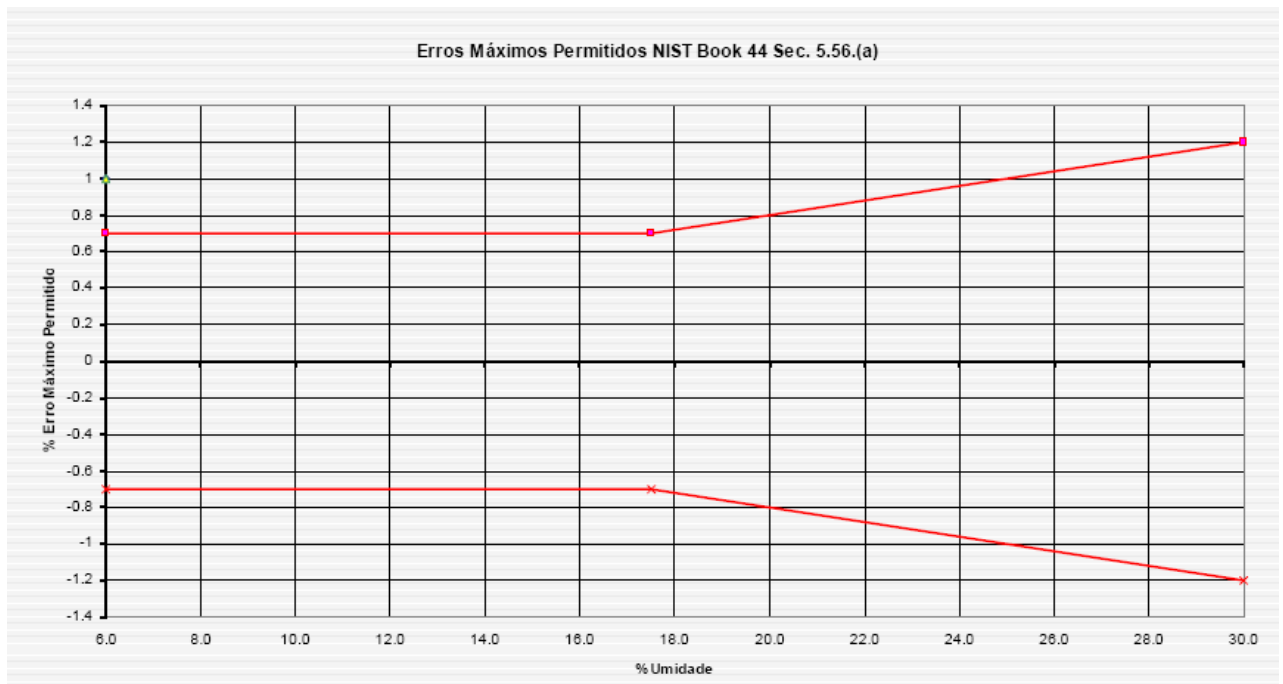


Figura 4. Errores máximos permitidos NIST.

Fuente: Handbook 44 – Edición 2008

La norma OIML R59 menciona 3 aspectos importantes para valorar los medidores de contenido de humedad, la precisión, la repetibilidad y la reproducibilidad con base en un error máximo permisible MEP del contenido de humedad. En el tabla 2 se usa el MEP multiplicado por un factor según sea para precisión, repetitividad y reproducibilidad.

La **precisión** es el análisis de humedades para un solo equipo con respeto al horno como método de referencia; se tienen dos formulas, la primera es el promedio de las diferencias \bar{Y} , (ecuación 5) y la segunda es la desviación estándar de las diferencias SDD (ecuación 6), trabajando con la tres repeticiones y el promedio de las mismas para cada medición.

$$y = \frac{\sum_{i=1}^n (x - ri)}{n} \quad (5)$$

$$SDD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y)^2}{n-1}} \quad (6)$$

Donde:

y : Promedio de todos los y_i .

y_i : $x_i - r_i$.

x_i : Promedio humedades por el medidor para muestra i (3 replicas).

r_i : Humedad referencia para muestra 1.

n : Número de muestras a intervalos de humedad 2 %.

La repetibilidad (SD) es el análisis de dispersión de los datos de contenidos de humedad C.H obtenido en cada equipo según la fórmula (7).

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^3 (x_{ij} - x_i)^2}{2n}} \quad (7)$$

Donde:

x_{ij} : Valor del medidor de humedad de la muestra y repetición i j .

x_i : Media de los tres valores de humedad de la muestra i .

n : Número de muestras por intervalo de humedad del 2% (n: 10).

La **reproducibilidad** (SDD_1) es el análisis entre los diferentes equipos de medición indirectos. Se analizan entre dos equipos según la fórmula (8), para ver la dispersión de las mediciones entre uno y otro.

$$SDD_1 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i - d)^2}{n-1}} \quad (8)$$

Donde:

d_i : x_{i1} - x_{i2} .

x_{i1} : Promedio de tres replicas para muestra 1.

x_{i2} : Promedio de tres replicas para muestra 2.

d : Promedio de las diferencias (d_i).

n : Número de muestras por intervalo de humedad del 2% (n : 10).

Tabla 2. Parámetros requeridos para los medidores

Precisión	\bar{Y} y SDD	0,5xMPEs
Repetitividad	SD	0,25xMPEs
Reproducibilidad entre instrumentos	SDD_1	0,3xMPEs

Fuente: OIML- R59.

CAPÍTULO 4: Metodología.

4.1 Muestreo.

Las muestras de frijol con humedad de campo provienen de la zona Sur del país conocida como la región Brunca específicamente en las localidades: El Águila de Pejibaye, Veracruz, Concepción de Pilas y Guararal de Buenos Aires (figura 6). Donde se muestreó a un solo productor por región (figura 7 y 8) en las diferentes plantas de acopio, una cantidad aproximada de 4 muestras de 10 kilogramos de frijol rojo Cabécar y 4 muestras de 7 kilogramos de frijol negro Guaymí.

Este muestreo fue realizado en el mes de Agosto del 2010, cuyas condiciones climáticas fueron muy malas para los productores de dichas zonas, debido a condiciones lluviosas que afectaron el secado de campo y a los altos contenidos de humedad del frijol, lo cual ocasionó pérdidas según lo que se pretendía cosechar en esas zonas. Según información suministrada por la Subregión Pejibaye del CNP, se estimaba un rendimiento de 20 qq³ por hectárea, pero se obtuvo un rendimiento de 14 qq por hectárea para 1500 hectáreas sembradas aproximadamente de frijol en las zonas de muestreo.

El grano que se recolectó estaba muy húmedo por lo cual se tuvo que almacenar en condiciones de temperatura y humedad relativa controlada para disminuir su deterioro, mientras se llevaba al Laboratorio de Control de Calidad Agrícola del Consejo Nacional de Producción ubicado en Planta La China, San Joaquín de Flores, Heredia.

Los diferentes contenidos de humedad en los frijoles rojos de la variedad Cabécar y negros de la variedad Guaymí, se obtienen secándolos en condiciones controladas en una secadora de arroz modificada de laboratorio, descrito en el procedimiento. Las humedades medidas

³ qq: Abreviatura utilizada para referirse a un quintal de grano, equivalente a 46 kilogramos aprox.

para el grano son un promedio de 3 repeticiones obtenidas en cada equipo, luego se obtuvo el contenido de humedad de referencia el cual también es un promedio de tres repeticiones, utilizando un horno de convección forzada con el método oficial 44-15 de la American Association of Cereal Chemists (AACC,1999).

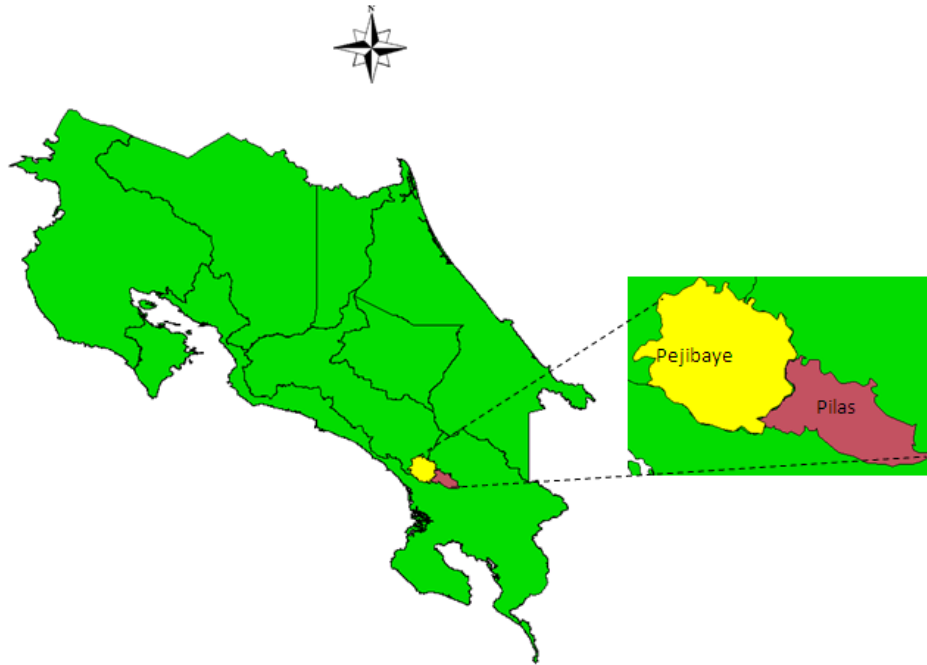


Figura 5. Zonas de muestreo (Pejibaye y Pilas)

Fuente: Elaboración propia.



Figura 6. Muestreo por región



Figura 7. Muestro de un solo sacco

Fuente: Elaboración propia

4.2 Materiales y Equipos utilizados.

- Horno convección forzada SalvisLab Thermocenter TC160.
- Secadora de arroz del laboratorio modificada.
- Balanza digital.
- Balanza analítica digital.
- Medidor de humedad Gehaka G919-Agri.
- Medidor de humedad DICKEY-John GAC® 2100.
- Medidor de humedad Motomco 919.
- Medidor de humedad Grainman (919 Canadiense).
- Desecadores.
- Homogenizador tipo Cargo para uniformizar y dividir la muestra.
- Recipientes con tapa de aluminio.
- Recipientes de plástico hermético “Seedburo”.

4.3 Procedimiento para reducir el contenido de humedad al grano.

- 1- Se Homogenizó la muestra utilizando un homogenizador tipo Cargo y se obtuvieron las submuestras necesarias, lo cual aseguró la representatividad de la muestra en la zona recolectada, esto se repitió hasta llegar a una cantidad de 500 gramos.
- 2- Luego se pesó en una balanza los 500 g aproximadamente y se almacenaron en recipientes plásticos herméticos identificados.
- 3- Una muestra representó la humedad del grano proveniente del campo y las otras muestras que se secaron posteriormente, se almacenaron en recipientes plásticos en una cámara de refrigeración a una temperatura de 15 °C por 7 días (Alizaga, 1981).

- 4- Los diferentes contenidos de humedad se obtuvieron al secar el grano a una temperatura aproximada de 40 °C (Mazon, 2007) a distintos tiempos.
- 5- Luego del secado gradual y de la obtención de los diferentes contenidos de humedad, se realizó la prueba al horno como método patrón con el método oficial 44-15 de la American Association of Cereal Chemists.

CAPÍTULO 5: Resultados y Discusión.

5.1 Generalidades.

Los valores de contenido de humedad medidos en cada equipo se comportan mejor entre los puntos de 10 % hasta un 18 % C.H, lo cual se pudo apreciar al realizar gráficos de dispersión de los contenidos de humedad de cada medidor en función del valor obtenido con el horno.

Este rango de medición lo utilizan en la calibración que hace el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA) a través del Servicio Federal de Inspección de Granos (FGIS por sus siglas en inglés). Dicha entidad realizaron curvas de calibración en el medidor oficial Dickey John Gac2100, en los diferentes granos que se comercializan en ese país y en donde para el grano de frijol crearon curvas de calibración de medición de contenido de humedad entre los puntos 10 a 18 %. El sesgo de contenido de humedades se escogió por ser el rango (10 a 18 %) utilizado por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos para frijol, dado que es la única información disponible en materia de las curvas de contenido de humedad y además, como se logró visualizar en los gráficos obtenidos entre esos puntos, los métodos tienen menos dispersión y son más estables en sus mediciones.

También para los gráficos de dispersión de los contenidos de humedad de cada medidor se les realizaron tratamientos de regresión, para escoger cual curva ajustaba mejor, primero para todos los puntos de contenido de humedad obtenidos en el secado de frijol, luego para el rango comprendido entre el 10 % hasta el 18 %.

5.2 Resultados para frijol Rojo de la variedad Cabécar.

En el tabla 3 se pueden observar los valores de contenido de humedad obtenidos con los equipos de medición indirecta y su respectivo valor de referencia obtenido con el horno, para un total de 53 puntos, de los cuales solo se utilizaron 40 puntos que están comprendidos

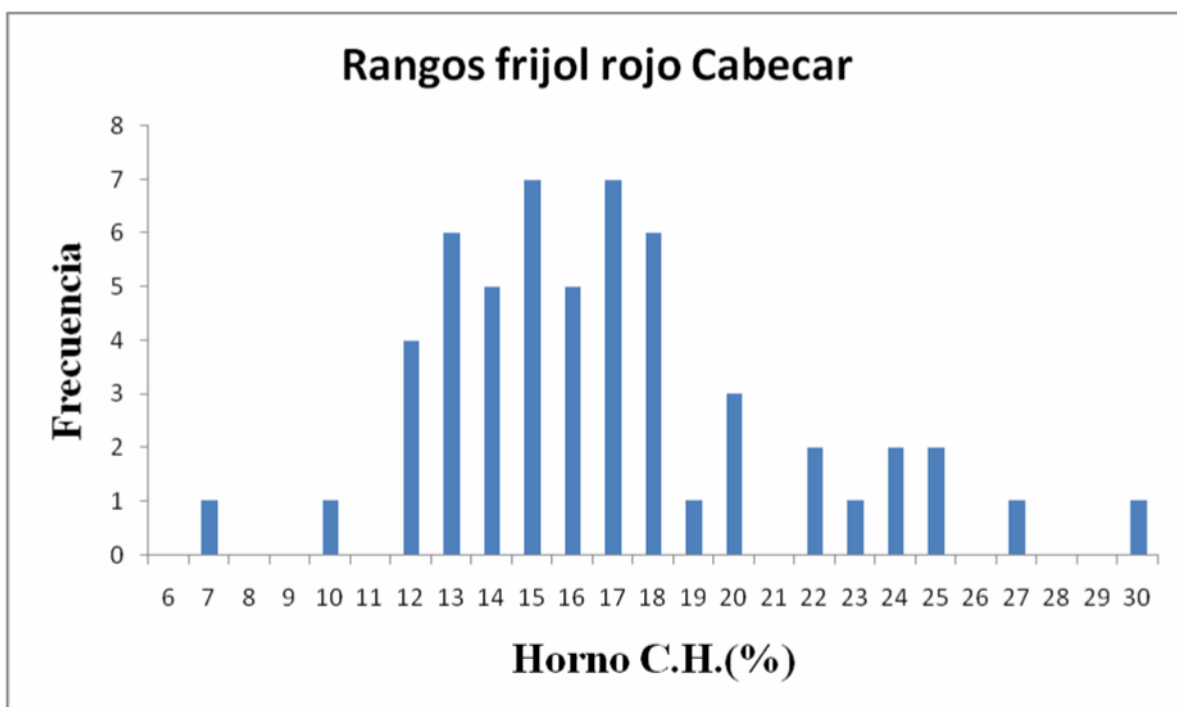
entre el 10 % y 18 % de C.H. para los análisis con las normas internacionales. En esta misma tabla se puede observar en la primera columna los valores C.H. los cuales se encuentran entre 29,17 % y 6,86 % C.H. con una diferencia entre ellos de 22,31%.

Tabla 3. Datos de contenido de humedad para frijol rojo Cabécar en el horno de convección y en cada equipo.

Horno C.H. (%)	Dickey John C.H. (%)	Grainman Canadiense C.H. (%)	Gehaka 919 C.H. (%)	Motomco 919 C.H. (%)	Horno C.H. (%)	Dickey John C.H. (%)	Grainman Canadiense C.H. (%)	Gehaka 919 C.H. (%)	Motomco 919 C.H. (%)
29,17	34,60	27,20	22,20	27,51	15,03	18,20	16,78	16,40	17,41
24,86	27,10	25,36	20,50	21,78	14,93	17,30	16,72	15,80	17,04
23,61	35,80	27,47	21,50	24,48	14,89	16,60	15,98	14,90	16,31
21,91	24,80	19,77	19,10	20,19	14,63	16,10	15,75	14,70	16,11
21,69	29,60	25,12	20,40	22,21	14,47	17,10	16,90	15,80	17,21
19,52	21,80	18,61	18,30	19,02	14,31	15,40	15,62	14,10	16,00
19,17	25,00	18,87	18,00	19,25	14,24	15,40	15,25	14,30	15,75
19,08	26,70	19,81	19,80	20,00	14,05	16,20	15,87	15,00	16,50
18,33	21,90	19,53	17,90	19,53	13,75	15,70	15,43	14,50	16,06
17,69	21,50	18,21	17,50	19,28	13,45	14,90	14,95	13,80	14,92
17,62	19,90	18,52	17,30	18,52	13,39	15,30	15,00	14,00	15,76
17,61	19,30	17,87	17,00	18,55	13,30	14,50	13,62	13,30	13,72
17,36	19,70	18,34	16,90	18,34	13,24	14,60	15,01	13,30	15,14
17,32	19,60	18,73	17,20	18,99	12,88	14,40	14,69	13,30	15,20
16,83	20,80	18,07	17,40	18,37	12,63	13,40	13,86	12,70	13,86
16,80	18,40	17,75	16,60	17,88	12,43	13,70	13,91	12,50	14,05
16,58	18,10	17,40	16,40	17,65	12,34	13,90	14,20	12,20	14,20
16,52	18,00	17,42	16,10	17,80	12,27	13,20	13,53	12,40	13,81
16,34	18,70	18,34	15,70	18,34	12,17	13,80	13,44	12,60	13,91
16,27	17,20	16,87	16,00	17,37	11,84	13,00	13,06	11,80	13,06
16,16	16,90	16,76	15,80	17,26	11,76	13,30	13,02	12,10	13,58
15,91	19,30	17,55	16,80	17,68	11,54	12,80	13,72	11,40	13,44
15,74	17,00	16,13	15,10	16,88	11,15	12,10	12,18	11,10	12,77
15,57	16,70	16,68	15,70	16,93	9,67	11,00	10,96	8,90	10,96
15,55	16,90	16,43	15,00	16,81	6,86	7,90	8,60	6,70	8,43

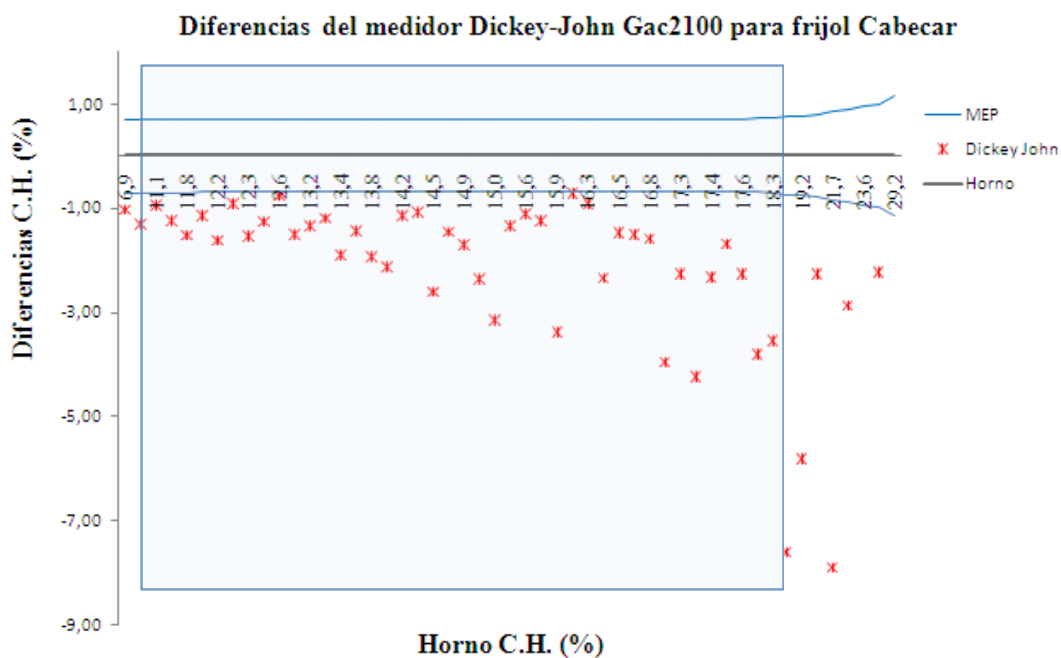
En el grafico 1 se agruparon los datos en rangos de 1 % para el contenido de humedad del frijol rojo obtenidos con la secadora, y su correspondiente frecuencia, donde se puede notar la mayor concentración de contenidos de humedad los cuales se encuentran entre 12 % y 18 %, cuyos valores de frecuencia se encuentran en la tabla 21 (Anexo A).

Grafico 1. Histograma de frecuencias a intervalos de 1% de contenido de humedad para el frijol rojo Cabécar.



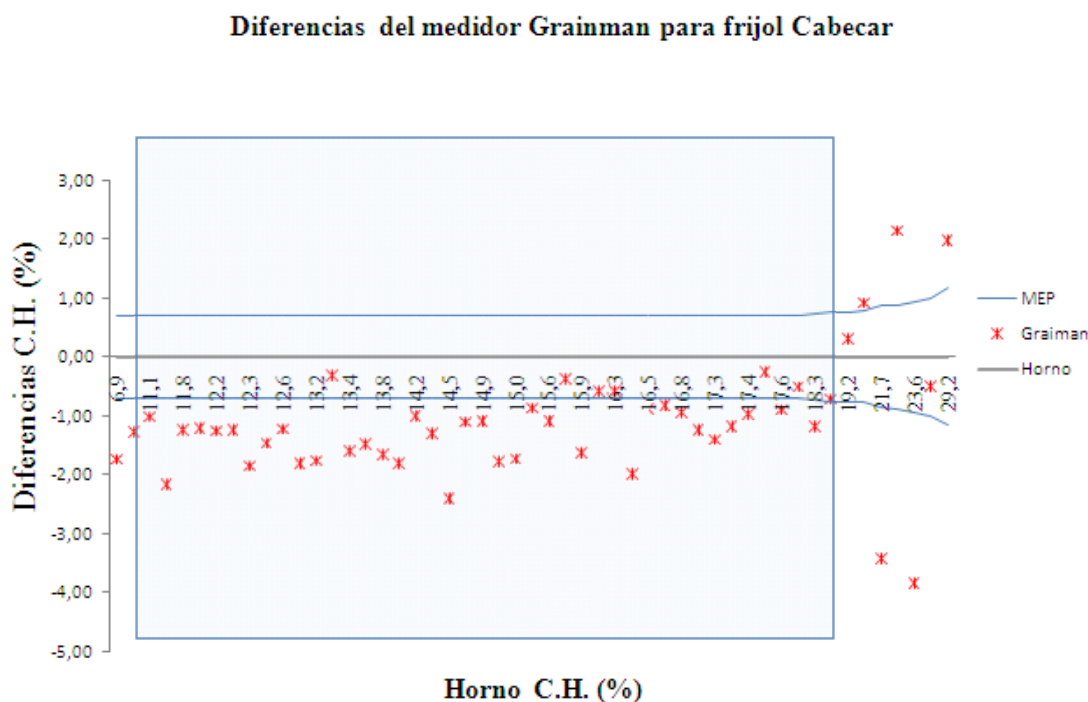
Para el Dickey John Gac2100 se puede notar en el grafico 2, que las diferencias están entre -0,74% y -3,97 % dentro del rango de trabajo de 10 % a 18 % de C.H .del área sombreada, de modo que como se puede apreciar el equipo siempre subestima los valores del contenido de humedad. Además hacia mayores contenidos de humedad las diferencias tienen a aumentar, pero no hay un comportamiento constante en todos los puntos. La máxima diferencia es de -3,97 % que corresponde al contenido de humedad del horno de 16,83 % y con el medidor Dickey-John una lectura de 20,80 % según la tabla 22 (Anexo A).

Grafico 2. Diferencia del medidor Dickey John -horno y el máximo error permitido con respecto al contenido de humedad del horno para frijol Cabécar.



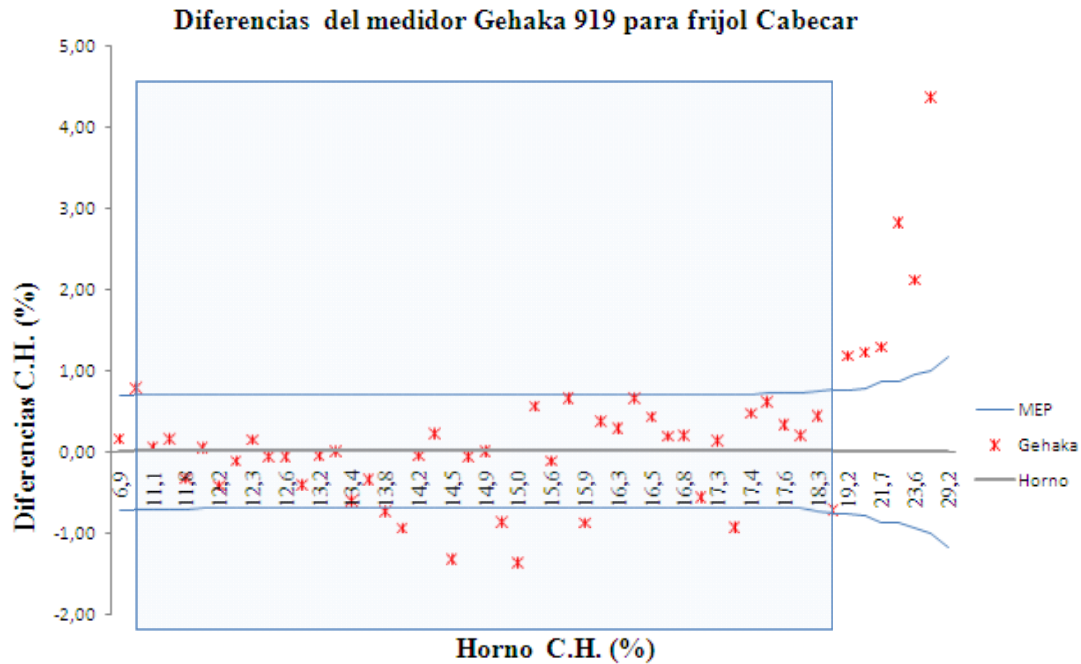
En el grafico 3 se puede apreciar que hay 9 puntos que están dentro de la tolerancia para el medidor Grainman, mientras que los demás valores están por debajo de los valores reales y por encima de los 19 % de C.H., hay mediciones tanto por encima como por debajo del valor real. Para el medidor Grainman según la tabla 22 (Anexo A), la mayor diferencia es de -2,43 % y corresponde al contenido de humedad del horno de 14,47 % y con el medidor a una lectura de 16,9 %.

Grafico 3. Diferencia del medidor Grainman-horno y el máximo error permitido con respecto al contenido de humedad del horno para frijol Cabécar



Para el Gehaka 919 según el grafico 4 hay 36 puntos dentro de la tolerancia y 7 puntos que están por debajo de la tolerancia inferior; a partir del 19 % C.H., se ve un cambio en las mediciones ya que el medidor sobrestima los valores en algunos casos (valores por sobre el límite de tolerancia superior). Según la tabla 22 (Anexo A), la mayor diferencia es de -1,37 % y corresponde al contenido de humedad del horno de 15,03 % y con el medidor a una lectura de 16,4% C.H.

Grafico 4. Diferencia del medidor Gehaka-horno y el máximo error permitido con respecto al contenido de humedad del horno para frijol Cabécar



En el caso del Motomco 919, gráfico 5 para el rango comprendido entre 10 % y 18 % de C.H. hay 5 puntos dentro de la tolerancia, los demás el equipo los mide por debajo del valor de referencia quedando fuera de tolerancia. Para valores superiores al 20 % C.H. hay 3 puntos fuera de la tolerancia. Por otro lado según el tabla 22 (Anexo A), la mayor diferencia es de -2,74 % y corresponde al contenido de humedad del horno de 14,47 % y con el medidor una lectura de 17,21 % de C.H.

Grafico 5. Diferencia del medidor Motomco-horno y el máximo error permitido con respecto al contenido de humedad del horno para frijol Cabécar

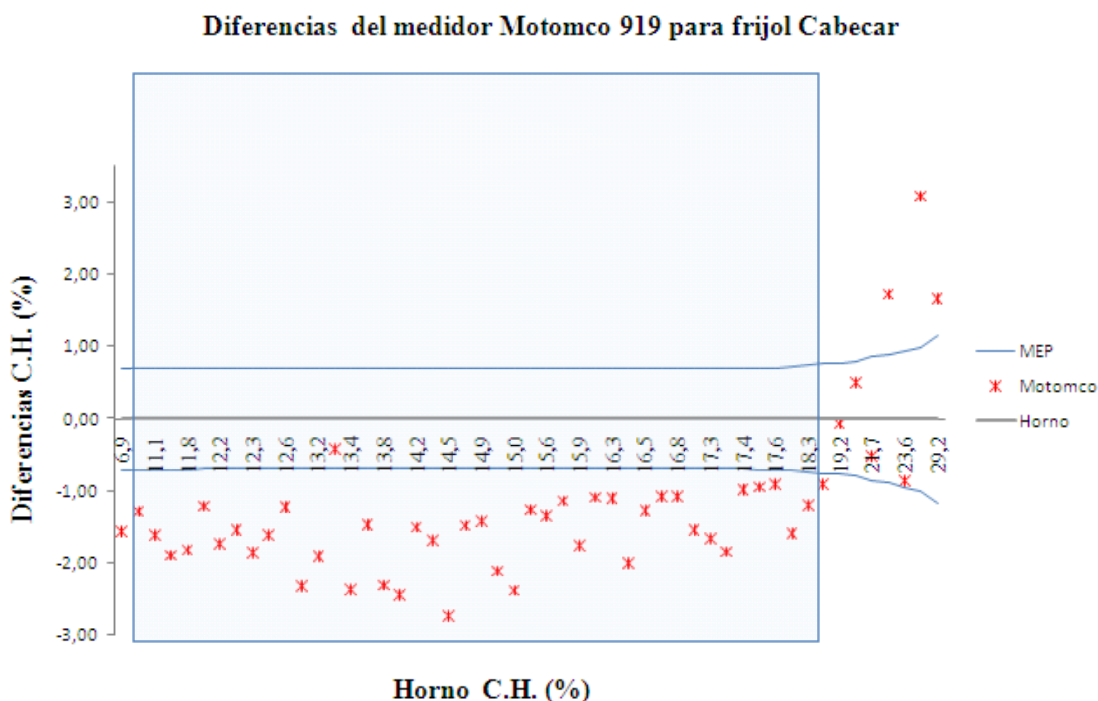
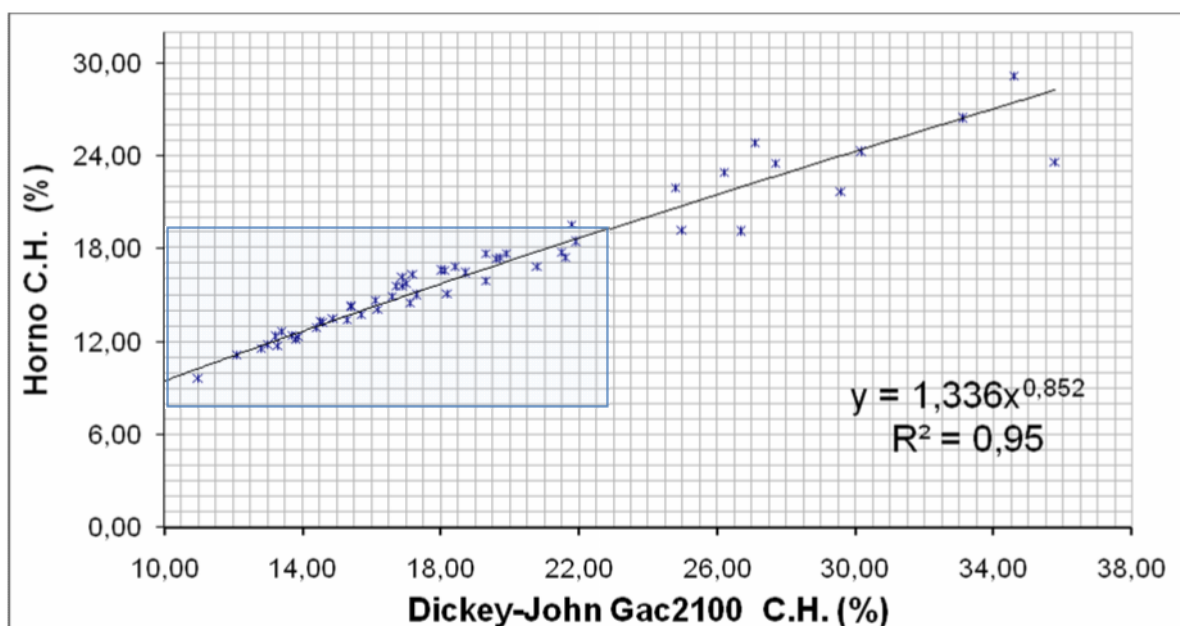


Tabla 4. Ajustes matemáticos realizados entre las mediciones del contenido de humedad en el Horno y el Dickey-John Gac 2100 para frijol rojo Cabécar

Tipo de ajuste	Ecuación Curva ajuste	R ²
Ajuste exponencial	$y : 7,268e^{0,040x}$	0,88
Ajuste lineal	$y : 0,695x + 3,139$	0,93
Ajuste logarítmica	$y : 13,95\ln(x) - 24,08$	0,93
Ajuste polinomio 2 ^{do} grado	$y : -0,010x^2 + 1,145x - 1,359$	0,94
Ajuste polinomio 3 ^{er} grado	$y : -2E-05x^3 - 0,009x^2 + 1,123x - 1,222$	0,94
Ajuste potencial	$y : 1,336x^{0,852}$	0,95

En el grafico 6 se tiene la distribución de contenido de humedad para frijol rojo con el medidor en función del horno, dentro del rango elegido (10% y 18 % C.H.) se puede notar que hay menos dispersión entre los métodos, para contenidos mayores a 18 % C.H. aumenta la diferencia entre las mediciones.

Grafico 6. Medición del contenido de humedad para el frijol rojo Cabececar con el medidor Dickey-John Gac 2100 en función del Horno. Ajuste Potencial.

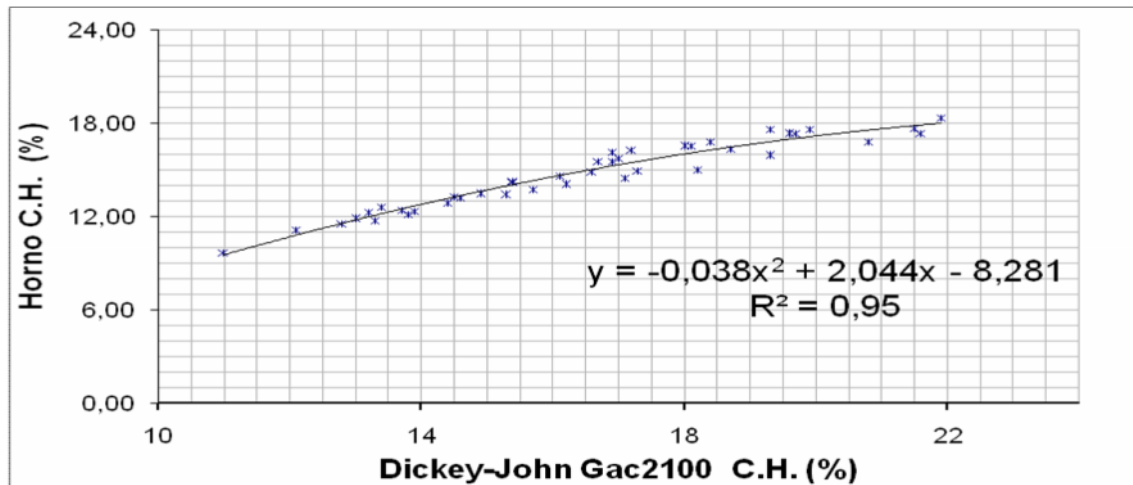


Por otro lado realizando los ajustes matemáticos para el área sombreada⁴ del gráfico 6, se tiene la tabla 4.1, donde se puede notar que los ajustes mejoraron, de manera que el que el mejor ajuste es un polinomio de segundo grado con una ecuación $y: -0,038x^2 + 2,044x - 8,281$ y un coeficiente de correlación $R^2:0,95$ como se aprecia en el gráfico 6.1.

Tabla 4.1. Ajustes matemáticos realizados entre las mediciones del contenido de humedad para el área sombrada en el Horno y el Dickey-John Gac 2100 para frijol rojo Cabécar.

Tipo de ajuste	Ecuación Curva ajuste	R ²
Ajuste exponencial	$y : 6,062e^{0,052x}$	0,91
Ajuste lineal	$y : 0,754x + 2,206$	0,93
Ajuste logarítmica	$y : 12,41\ln(x) - 19,98$	0,94
Ajuste polinomio 2 ^{do} grado	$y : -0,038x^2 + 2,044x - 8,281$	0,95
Ajuste polinomio 3 ^{er} grado	$y : -0,003x^3 + 0,145x^2 - 0,962x + 7,770$	0,95
Ajuste potencial	$y : 1,26x^{0,875}$	0,94

Grafico 6.1. Medición del contenido de humedad para el frijol rojo Cabececar con el medidor Dickey-John Gac 2100 en función del Horno. Ajuste polinomio 2do grado.



⁴ Área comprendida entre los contenidos de humedad 10 % hasta 18 %, para realizar nuevas curvas de ajustes y los estudios con las normas.

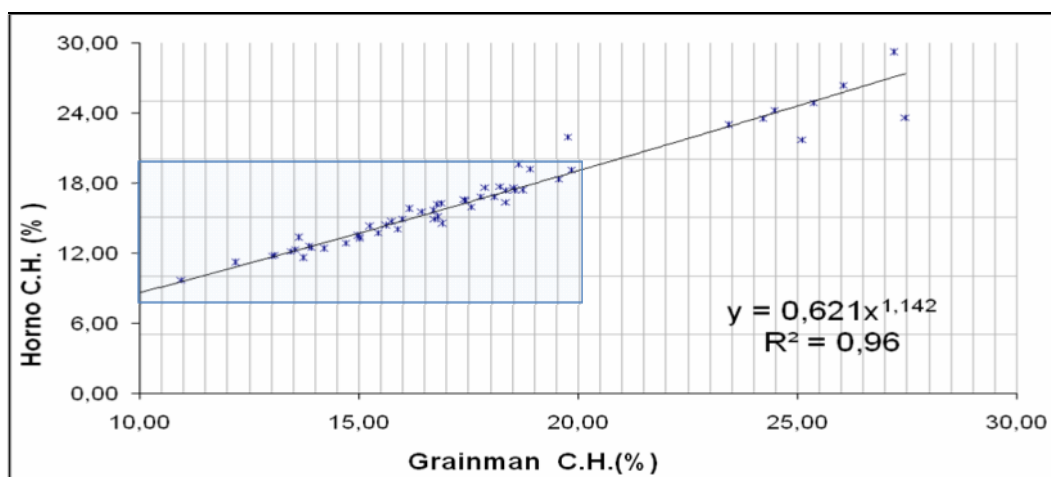
En el caso del medidor Grainman se tiene la tabla 5 la cual es un resumen de los tipos de ajuste matemáticos, la ecuación y el coeficiente de correlación correspondiente, donde se puede apreciar un mejor ajuste potencial con una ecuación $y : 0,621x^{1,142}$ y con un coeficiente de correlación $R^2 : 0,96$.

Tabla 5. Ajustes matemáticos realizados entre las mediciones del contenido de humedad para el área sombrada el Horno y el Grainman para frijol rojo Cabécar

Tipo de ajuste	Ecuación Curva ajuste	R^2
Ajuste exponencial	$y : 5,293e^{0,062x}$	0,92
Ajuste lineal	$y : 1,054x - 2,024$	0,95
Ajuste logarítmica	$y : 18,56\ln(x) - 36,23$	0,93
Ajuste polinomio 2 ^{do} grado	$y : -0,005x^2 + 1,278x - 4,037$	0,95
Ajuste polinomio 3 ^{er} grado	$y : -0,001x^3 + 0,081x^2 - 0,236x + 4,262$	0,95
Ajuste potencial	$y : 0,621x^{1,142}$	0,96

En el grafico 7 se tiene la distribución para frijol rojo en el medidor Grainman, el cual demuestra una clara dispersión para contenidos mayores al 18 % C.H; por debajo de ese punto hay menos dispersión entre métodos.

Grafico 7. Medición del contenido de humedad para el frijol rojo Cabécar con el medidor Grainman en función del Horno. Ajuste potencial.

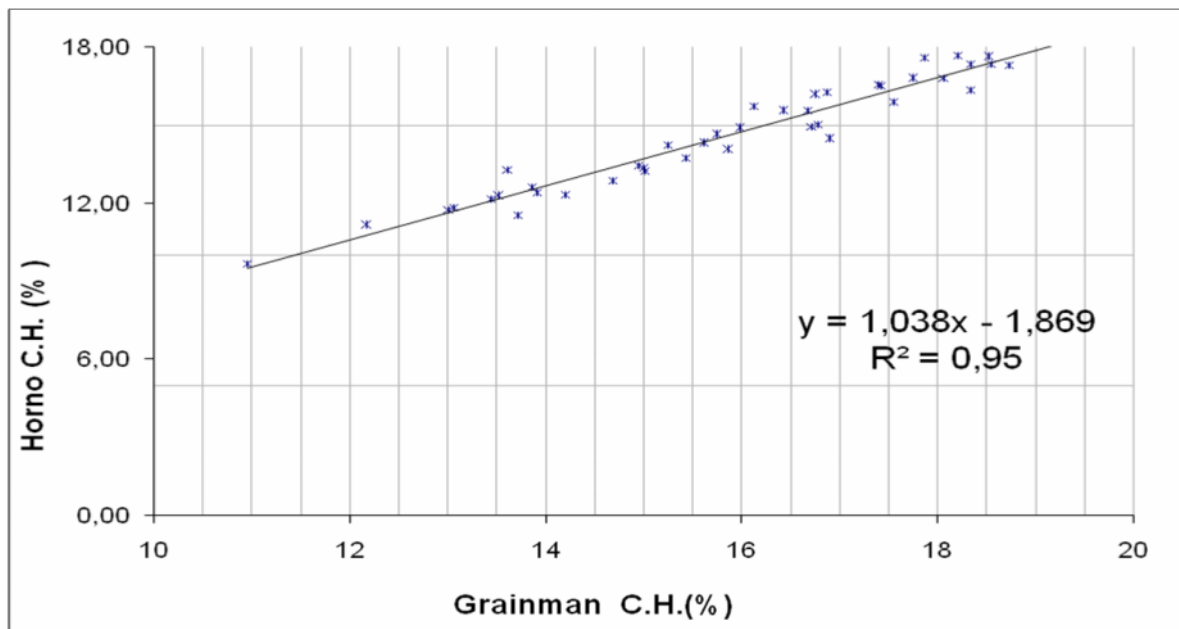


Realizando los ajustes matemáticos para el área sombreada, se tiene la tabla 5.1, donde se puede notar que los ajustes mejoraron un poco en algunos casos, de modo que para los nuevos ajustes casi todos tienen el mismo coeficiente de correlación, por lo cual se toma como mejor curva de regresión el ajuste lineal con una ecuación $y: 1,038x - 1,869$ y un coeficiente de correlación $R^2: 0,95$, como se observa en el gráfico 7.1.

Tabla 5.1 Ajustes matemáticos realizados entre las mediciones del contenido de humedad para el área sombreada en el Horno y el Grainman para frijol rojo Cabécar

Tipo de ajuste	Ecuación Curva ajuste	R ²
Ajuste exponencial	$y : 4,506e^{0,073x}$	0,95
Ajuste lineal	$y : 1,038x - 1,869$	0,95
Ajuste logarítmica	$y : 15,83\ln(x) - 29,02$	0,94
Ajuste polinomio 2 ^{do} grado	$y : 0,013x^2 + 0,615x + 1,367$	0,95
Ajuste polinomio 3 ^{er} grado	$y : -0,004x^3 + 0,228x^2 - 2,631x + 17,48$	0,95
Ajuste potencial	$y : 0,648x^{1,126}$	0,95

Gráfico 7.1. Medición del contenido de humedad para el frijol rojo Cabecear con el medidor Grainman en función del Horno. Ajuste lineal



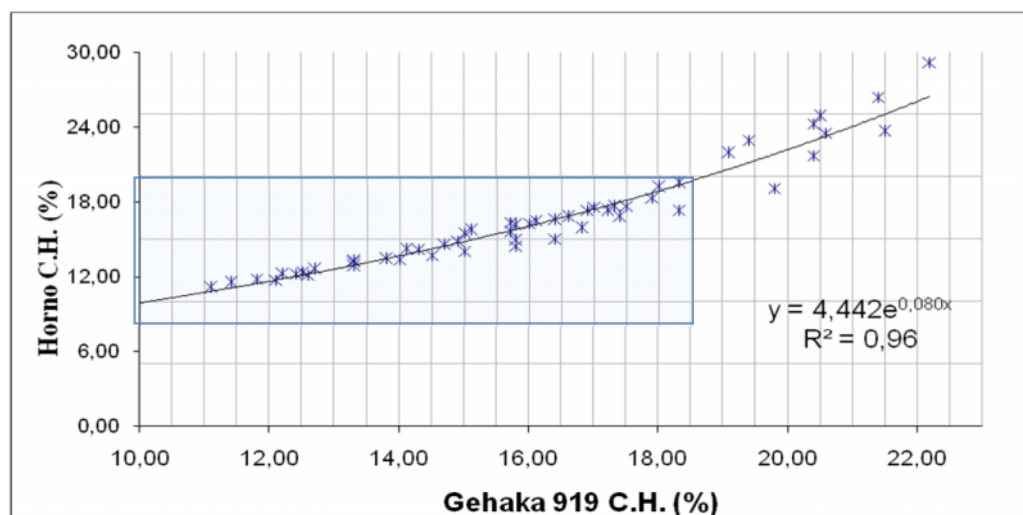
En el caso del medidor Gehaka los ajustes matemáticos aplicados, la ecuación y el coeficiente de correlación se muestran en la tabla 6; donde el mejor ajuste es exponencial con una ecuación $y = 4,442e^{0,080x}$ con un coeficiente de correlación $R^2: 0,96$.

Tabla 6 Ajustes matemáticos realizados entre las mediciones del contenido de humedad en el Horno y el Gehaka 919 en frijol rojo Cabécar

Tipo de ajuste	Ecuación Curva ajuste	R ²
Ajuste exponencial	$y : 4,442e^{0,080x}$	0,96
Ajuste lineal	$y : 1,293x - 4,075$	0,91
Ajuste logarítmica	$y : 17,76\ln(x) - 32,26$	0,83
Ajuste polinomio 2 ^{do} grado	$y : 0,059x^2 - 0,555x + 9,600$	0,95
Ajuste polinomio 3 ^{er} grado	$y : 0,006x^3 - 0,235x^2 + 3,587x - 8,581$	0,96
Ajuste potencial	$y : 0,691x^{1,143}$	0,94

Para el grafico 8 se tiene la distribución para frijol rojo en el medidor Gehaka 919 en función del horno, se puede apreciar un mejor comportamiento entre métodos, un poco mas disperso para contenidos mayores al 18 %.

Grafico 8. Medición del contenido de humedad para el frijol rojo Cabécar con el medidor Gehaka en función del Horno. Ajuste exponencial.

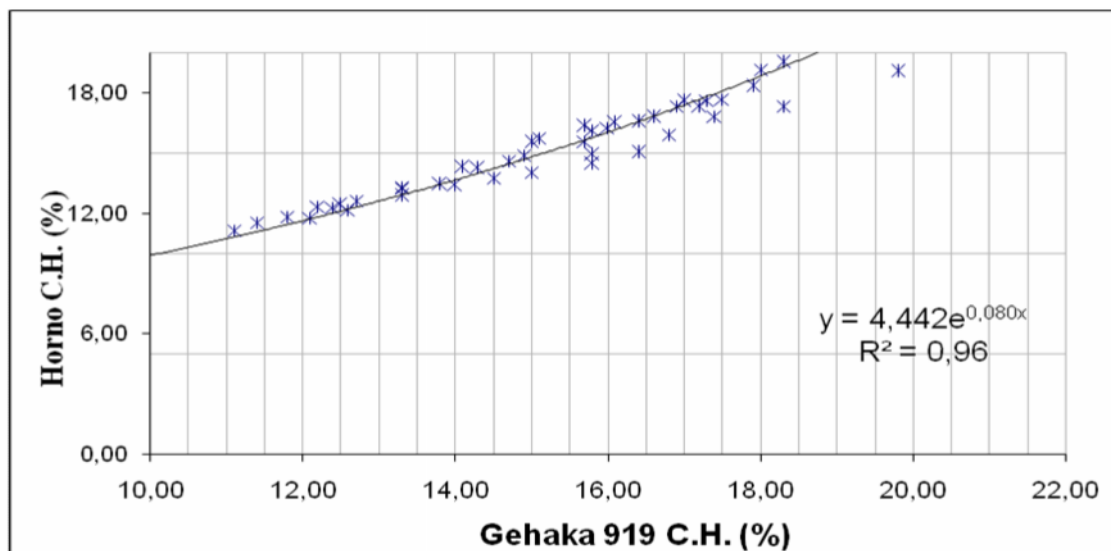


Del mismo modo realizando los ajustes matemáticos para el área sombreada, se tiene la tabla 6.1, donde se puede notar que los ajustes se mantuvieron igual a los realizados con todos los contenidos de humedad, por lo cual se usa la ecuación exponencial como mejor ajuste con una ecuación $y : 4,442e^{0,080x}$ y un coeficiente de correlación $R^2: 0,96$.

Tabla 6.1. Ajustes matemáticos realizados entre las mediciones del contenido de humedad para el área sombrada en el Horno y el Gehaka 919 en frijol rojo Cabécar

Tipo de ajuste	Ecuación Curva ajuste	R ²
Ajuste exponencial	$y : 4,442e^{0,080x}$	0,96
Ajuste lineal	$y : 1,293x - 4,075$	0,91
Ajuste logarítmica	$y : 17,76\ln(x) - 32,26$	0,83
Ajuste polinomio 2do grado	$y : 0,059x^2 - 0,555x + 9,600$	0,95
Ajuste polinomio 3er grado	$y : 0,006x^3 - 0,235x^2 + 3,587x - 8,581$	0,96
Ajuste potencial	$y : 0,691x^{1,143}$	0,94

Gráfico 8.1. Medición del contenido de humedad para el frijol rojo Cabecear con el medidor Gehaka en función del Horno. Ajuste exponencial.



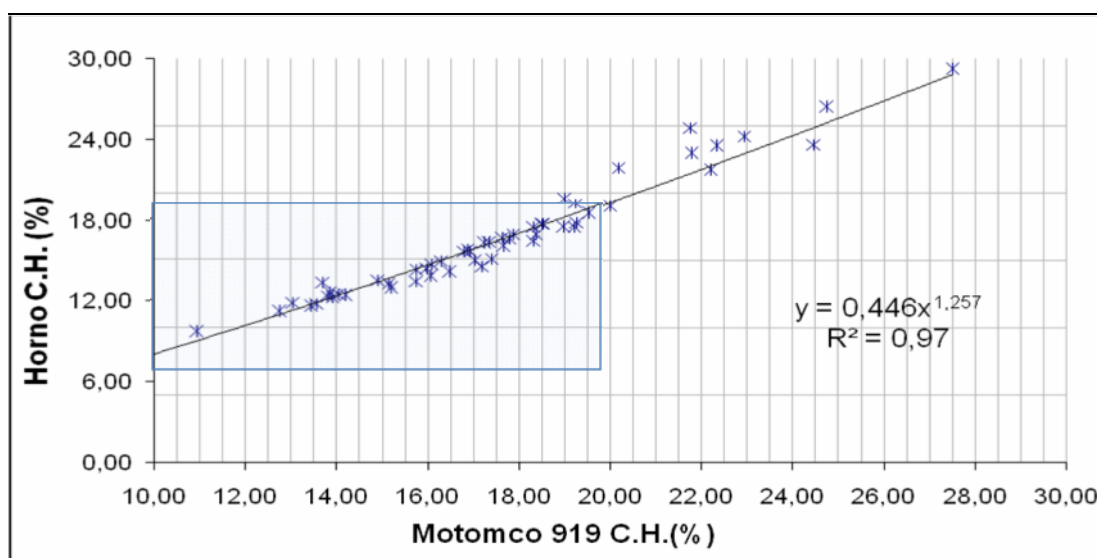
Para el medidor Motomco se tiene la tabla 7, el cual es un resumen de los tipos de ajustes matemáticos, la ecuación y el coeficiente de correlación, donde el mejor ajuste es el potencial con una ecuación $y = 0,446x^{1,257}$ con un coeficiente de correlación $R^2: 0,97$.

Tabla 7. Ajustes matemáticos realizados entre las mediciones del contenido de humedad en el Horno y el Motomco 919 en frijol rojo Cabécar.

Tipo de ajuste	Ecuación Curva ajuste	R^2
Ajuste exponencial	$y = 4,353e^{0,074x}$	0,96
Ajuste lineal	$y = 1,223x - 4,936$	0,95
Ajuste logarítmica	$y = 20,05\ln(x) - 40,54$	0,90
Ajuste polinomio 2 ^{do} grado	$y = 0,019x^2 + 0,537x + 1,009$	0,96
Ajuste polinomio 3 ^{er} grado	$y = -0,001x^3 + 0,116x^2 - 1,136x + 10,12$	0,96
Ajuste potencial	$y = 0,446x^{1,257}$	0,97

En el grafico 9 se tiene la distribución para frijol rojo en el medidor Motomco 919 en función del horno, también se nota mayor dispersión para contenidos mayores al 18 % y por debajo de ese valor hay menos dispersión entre métodos.

Grafico 9. Medición del contenido de humedad para el frijol rojo Cabécar con el medidor Motomco en función del Horno. Ajuste potencial.

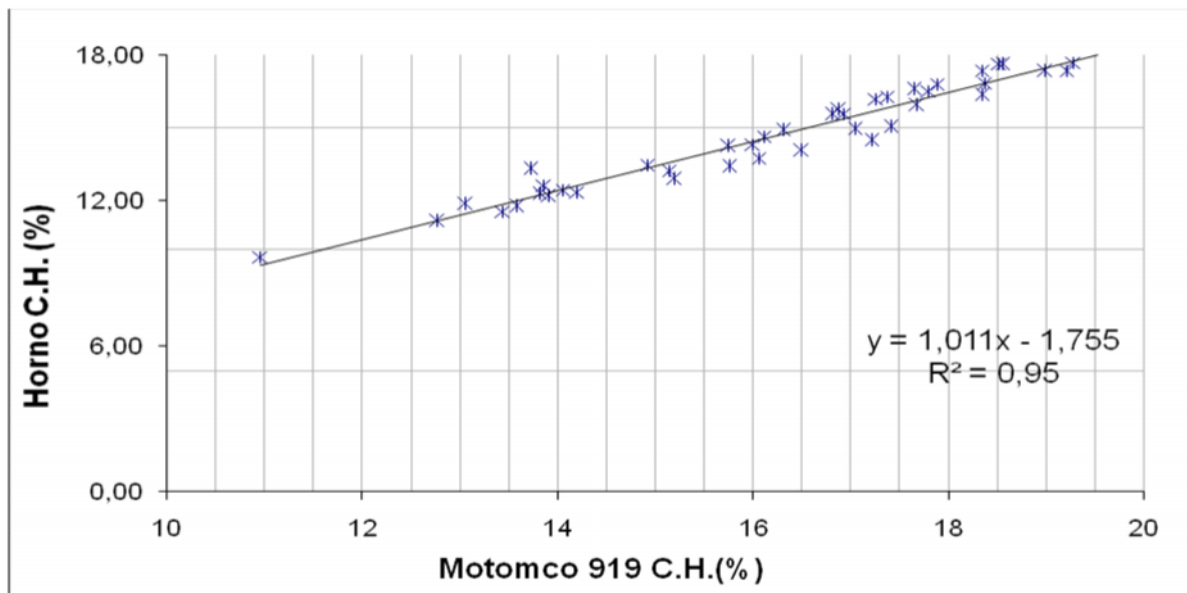


Realizando los ajustes matemáticos para el área sombreada, se tiene la tabla 7.1, donde se puede notar que los ajustes no mejoraron con respecto a la tabla anterior, de manera que el mejor ajuste es lineal con una ecuación $y: 1,011x - 1,755$ y un coeficiente de correlación $R^2: 0,95$ que se muestra en el gráfico 9.1.

Tabla 7.1 Ajustes matemáticos realizados entre las mediciones del contenido de humedad para el área sombrada en el Horno y el Motomco 919 en frijol rojo Cabécar.

Tipo de ajuste	Ecuación Curva ajuste	R2
Ajuste exponencial	$y : 4,532e^{0,071x}$	0,95
Ajuste lineal	$y : 1,011x - 1,755$	0,95
Ajuste logarítmica	$y : 15,58\ln(x) - 28,65$	0,93
Ajuste polinomio 2 ^{do} grado	$y : 0,027x^2 + 0,136x + 5,029$	0,95
Ajuste polinomio 3 ^{er} grado	$y : 0,000x^3 + 0,004x^2 + 0,485x + 3,275$	0,95
Ajuste potencial	$y : 0,661x^{1,110}$	0,95

Gráfico 9.1. Medición del contenido de humedad para el frijol rojo Cabecear con el medidor Motomco en función del Horno. Ajuste lineal



5.4 Análisis con la norma OIML R59 para el frijol rojo.

Como lo explica la norma el máximo error permitido (MEP), se calcula según el contenido de humedad de referencia obtenido con el horno, de manera que si la multiplicación de $0,04 \times C.H$ es menor a 0,7 el MEP es 0,7; de lo contrario si es mayor entonces el MPE es la multiplicación de $0,04 \times C.H$. Esto se puede apreciar mejor al graficar estas tolerancias en un grafico de control (figura 4), en la cual a partir de contenidos de humedad mayor al 18 % se amplía la tolerancia.

En el tabla 2 está el máximo error permisible MEP y los parámetros en precisión, repetitividad y reproducibilidad que debe cumplir cada medidor para ser valorados, teniendo como resultado la **tabla 8** para el frijol rojo.

Tabla 8. Parámetros de precisión, repetibilidad y reproducibilidad para los medidores según la recomendación OIMLR59 para el frijol rojo según MEP obtenido para frijol rojo.

Promedio MEP	y SDD $0,05 \times \text{MEP}$	SD $0,25 \times \text{MEP}$	SDD ₁ $0,3 \times \text{MEP}$
0,70	0,35	0,18	0,21

De modo que para el cálculo de la precisión \bar{Y} y SDD, utilizando las formulas (5) y (6) respectivamente, se tiene como resultado la tabla 9 para cada medidor con respecto al horno.

Tabla 9. Precisión \bar{Y} y SDD obtenidos en cada equipo en frijol rojo.

	Dickey-John Gac2100	Grainman	Gehaka 919	Motomco 919
\bar{Y}	1,96	1,22	0,44	1,52
SDD	0,91	0,50	0,35	0,50

Según se puede apreciar el medidor Gehaka tiene la menor desviación estándar SDD: 0,35 % entre sus mediciones con respecto al horno, de manera que cumple con el parámetro 0,35% requerido (tabla 8) y el equipo con mayor desviación estándar es el medidor Dickey-

John con un SDD: 0,91%; los otros medidores son el Motomco y el Grainman, los cuales tienen una desviación similar, SDD: 0,50 respectivamente, al igual que el Dickey John no cumplen con el parámetro requerido según las normas.

Para el cálculo de la repetibilidad SD, se usó la fórmula 7 y con la tabla 10, se tiene los valores para cada equipo para esta prueba.

Tabla 10. Repetibilidad SD obtenidos en cada equipo en frijol rojo

	Dickey-John Gac2100	Grainman	Gehaka 919	Motomco 919
SD	0,024	0,000	0,016	0,000

Donde se puede notar que el medidor Motomco y el Grainman tienen las desviaciones estándares SD: 0,000; más bajas entre sus mediciones; el Dickey John y el Gehaka reportan una SD: 0,024 y 0,016 respectivamente, de manera que los cuatro medidores cumplen con el parámetro de repetibilidad (SD) requerido igual a 0,18% entre sus mediciones (tabla 8), es decir sus mediciones son repetibles para un mismo tipo de muestra.

Para el cálculo de la reproducibilidad SDD_1 entre los medidores, se tiene la fórmula 8 y la tabla 11, con los resultados entre un medidor y otro. En este caso ninguno cumple con el parámetro SDD_1 : 0,21%. La menor diferencia de desviación estándar entre equipos está entre el Grainman y el Motomco con un valor de SDD_1 : 0,26 % relativamente cerca del parámetro requerido, y la mayor diferencia está entre el Dickey John y el Gehaka con un SDD_1 : 0,83 %.

Tabla 11 Reproducibilidad SDD_1 obtenidos entre equipos indirectos en frijol rojo

	Dickey- John y Grainman	Dickey- John y Ge- haka	Dickey- John y Motomco	Grainman y Gehaka	Grainman y Motomco	Gehaka y Mo- tomco
SDD_1	0,81	0,83	0,36	0,46	0,26	0,38

5.5 Frijol Negro de la variedad Guaymí.

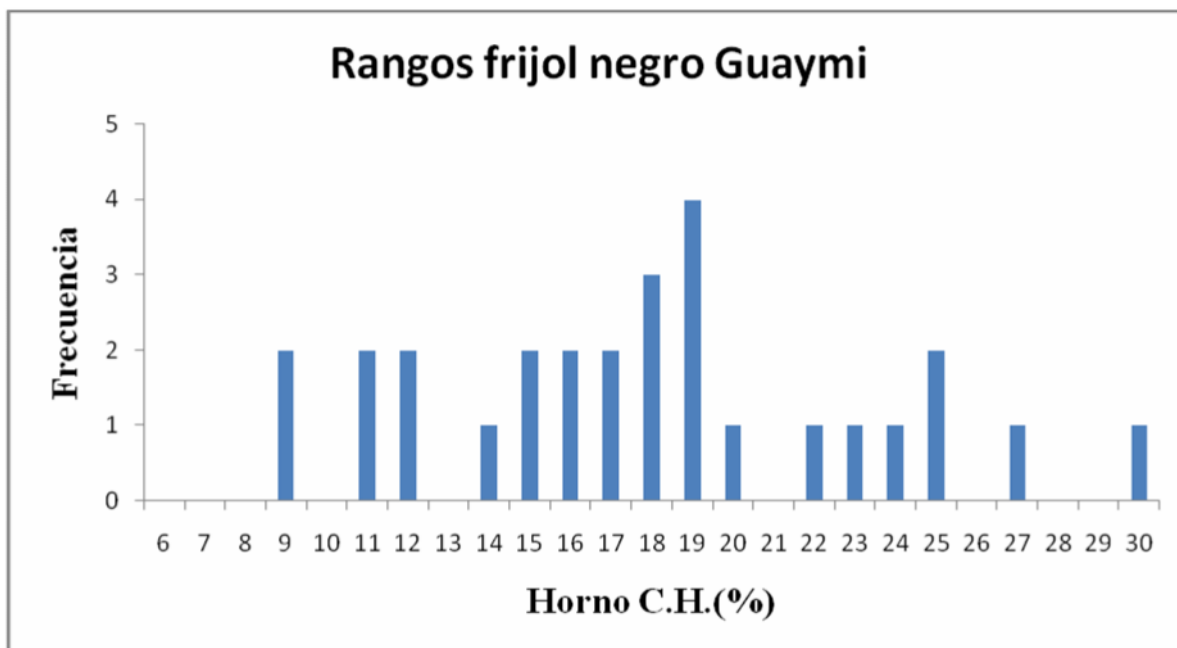
En la tabla 12 para el frijol negro, se pueden observar los valores de contenido de humedad obtenidos con los equipos de medición y su respectivo valor real obtenido con el método de referencia con un total de 25 puntos, cuyas humedades están en un rango de 26,17 % hasta los 8,63 % C.H.; de los cuales 18 puntos están entre los 10 % y los 18 % C.H. que es el rango seleccionado para el análisis respectivo de los datos.

Tabla 12. Contenido de humedad para frijol negro variedad Guaymí

Horno C.H. (%)	Dickey John C.H. (%)	Grainman Canadiense C.H. (%)	Gehaka 919 C.H. (%)	Motomco 919 C.H. (%)	Horno C.H. (%)	Dickey John C.H. (%)	Grainman Canadiense C.H. (%)	Gehaka 919 C.H. (%)	Motomco 919 C.H. (%)
26,17	27,40	24,90	20,10	24,35	16,14	16,70	17,30	14,90	16,79
23,63	27,40	25,91	19,00	25,20	15,19	15,70	16,20	14,40	15,53
22,53	24,20	23,55	19,00	23,13	15,06	16,40	16,20	16,19	16,19
21,16	24,10	24,88	18,40	23,04	15,06	16,40	16,20	16,19	16,19
19,31	23,00	23,32	17,80	21,60	14,19	14,70	14,90	13,80	13,46
18,87	19,20	19,00	18,97	18,97	14,09	15,00	14,90	14,29	14,29
18,55	19,80	20,20	17,20	19,12	13,08	15,30	15,90	14,50	15,09
18,26	19,00	19,40	16,70	19,01	11,97	14,00	13,90	13,10	13,96
18,07	20,00	19,00	17,00	14,72	11,36	13,40	13,30	12,70	13,10
17,37	19,20	18,22	17,00	18,61	10,44	11,00	11,40	10,50	11,38
17,22	17,70	17,70	15,90	18,16	10,21	12,10	12,30	11,40	11,82
17,01	18,00	17,70	17,95	17,95	8,77	7,30	5,90	9,10	6,17
16,32	17,00	17,10	17,19	17,19	8,63	9,10	10,50	9,80	9,41

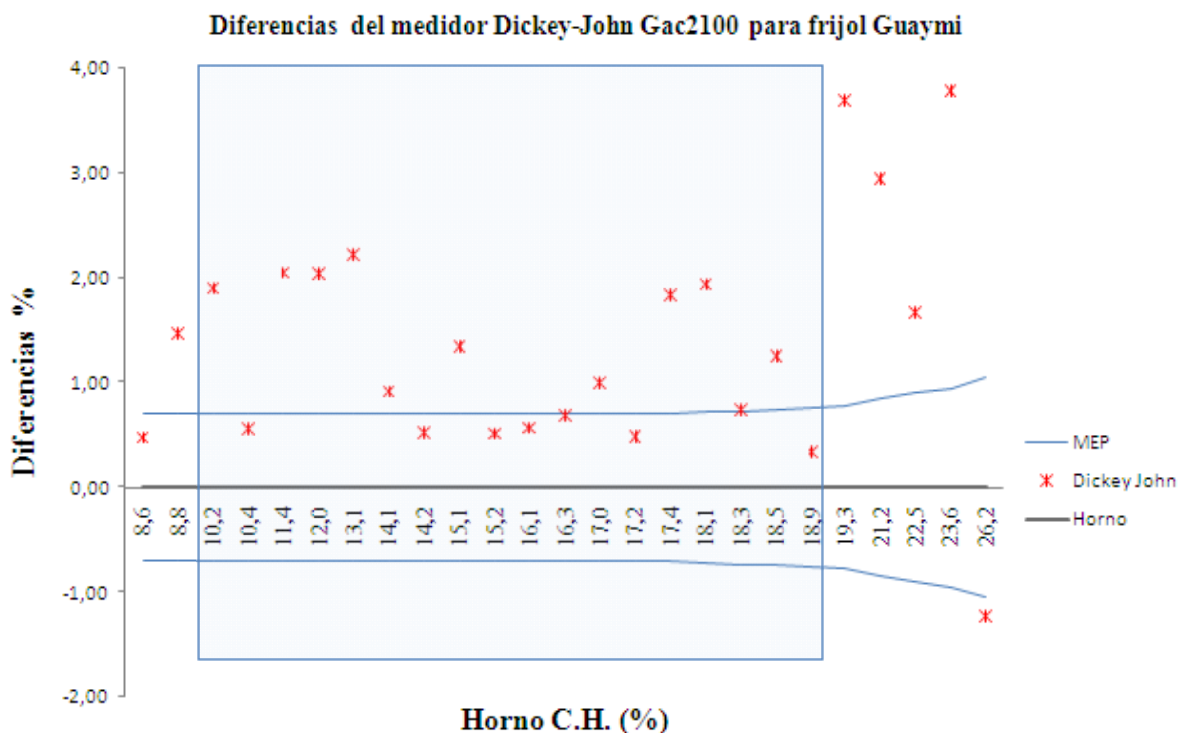
En el gráfico 10, se agrupan en rangos de 1 % para el contenido de humedad del frijol negro y su correspondiente frecuencia, donde se puede apreciar que la mayor concentración de los datos se encuentren entre el 9 % y 19 % C.H., (tabla 23 del Anexo A).

Grafico 10. Histograma de frecuencias a intervalos de 1% de contenido de humedad para el frijol negro Guaymí, obtenidos con la secadora



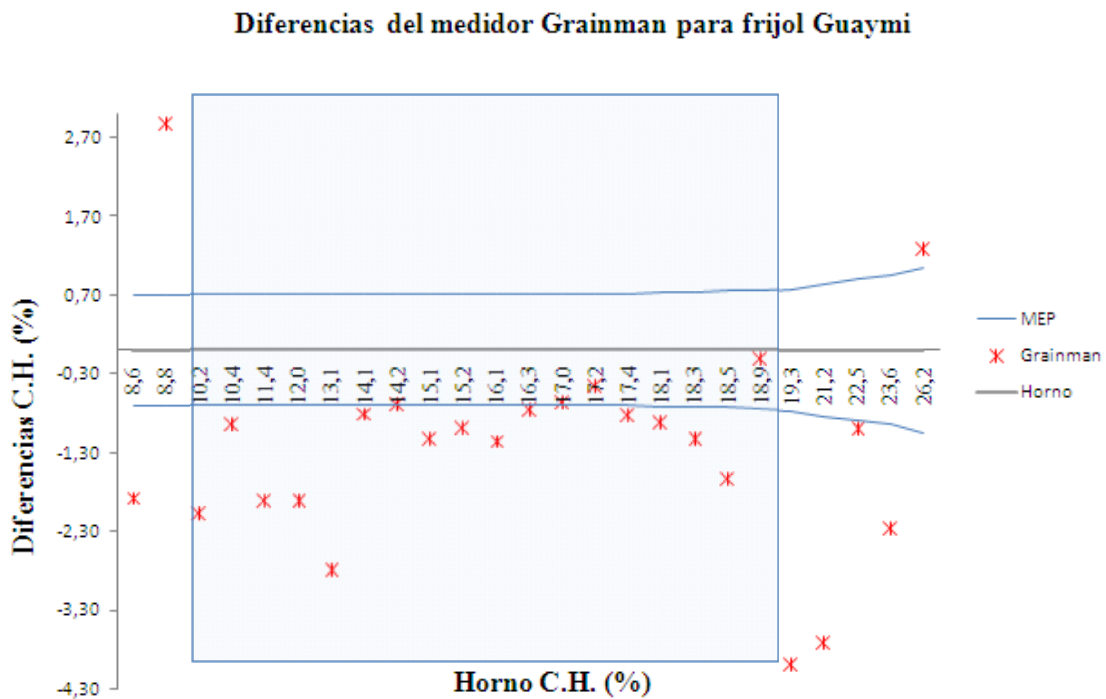
Para el medidor Dickey John Gac2100 hay ocho puntos de contenido de humedad dentro de la tolerancia (gráfico 11), los demás están por encima de la tolerancia superior, aumentando considerablemente para valores mayores al 19 % C.H., dentro del rango seleccionado se observan los valores que tienen mayor dispersión con respecto al real. De manera que la mayor diferencia es de -2,22 % y corresponde al contenido de humedad del horno de 13,08% y con el Dickey-John una lectura de 15,3%, ver tabla 24 (Anexo A).

Grafico 11. Diferencia del medidor Dickey-John Gac2100 y el máximo error permitido con respecto al contenido de humedad del horno para frijol Guaymí



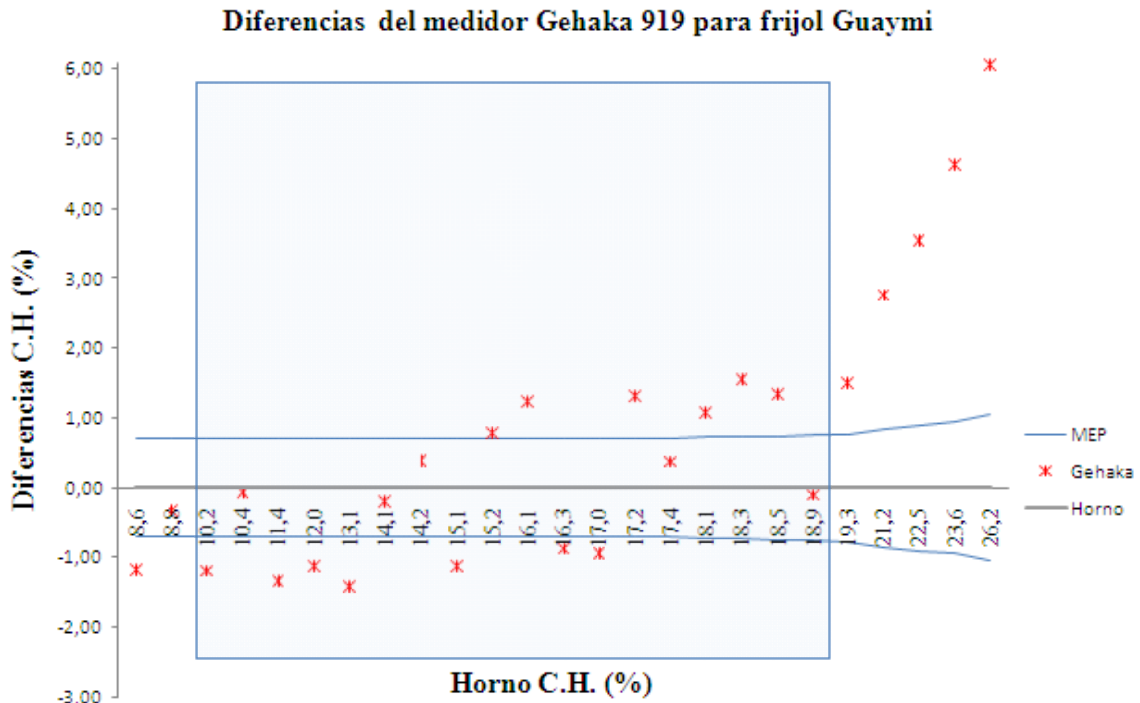
En el caso del medidor Grainman para el rango seleccionado, hay 4 puntos dentro de la tolerancia según la norma, los demás puntos el medidor los registra por debajo de la tolerancia inferior como se puede apreciar en el grafico 12, en las colas del grafico hay mayor dispersión. La mayor diferencia es de -2,82 % y corresponde al contenido de humedad del horno de 13,08 % y con el medidor una lectura de 15,9 % según tabla 24 (Anexo A).

Grafico 12. Diferencia del medidor Grainman y el máximo error permitido con respecto al contenido de humedad del horno para frijol Guaymí.



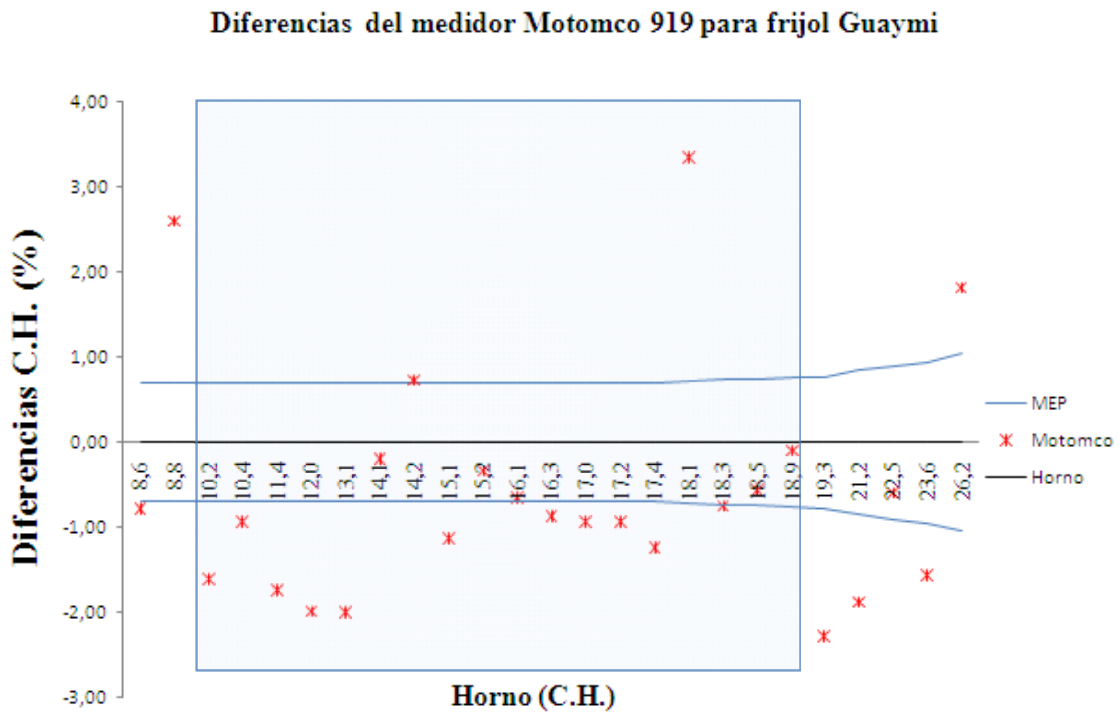
Por otro lado para el Gehaka según el grafico 13, se puede apreciar que hay 6 puntos dentro de la tolerancia, la dispersión es muy grande dado que posee valores en los cuales se subestima la medición (entre 8 y 14%) y otros por el contrario las sobreestima (mayores al 15%). La mayor diferencia es de 1,56 % y corresponde al contenido de humedad del horno de 18,26 % C.H y con el Gehaka a una lectura de 16,27 % C.H. según la tabla 24 (Anexo A).

Grafico 13. Diferencia del medidor Gehaka 919 y el máximo error permitido con respecto al contenido de humedad del horno para frijol Guaymí



En el grafico 14 para el Motomco, se puede apreciar que la mayoría de los puntos están por debajo de la tolerancia inferior, entre los 14 % y 19 % C.H. existen 6 puntos dentro de los límites de la tolerancia. La mayor diferencia es de 3,35 % y corresponde al contenido de humedad del horno de 18,07 % y con el medidor a una lectura de 14,72 %, ver tabla 24 (Anexo A).

Grafico 14. Diferencia del medidor Motomco 919 y el máximo error permitido con respecto al contenido de humedad del horno para frijol Guaymí



5.6 Resultados con los gráficos de mediciones del contenido de humedad y recta de mejor ajuste para cada medidor

Para el frijol negro, también se realizó una distribución del contenido de humedad obtenido con el horno con respecto a cada medición realizada en cada equipo, representada mediante un gráfico de dispersión, también se calculó cada ajuste matemático con su respectiva ecuación y el coeficiente de correlación para escoger el mejor ajuste. Luego se escogió el mismo rango para análisis utilizado anteriormente (10 al 18 % C.H.).

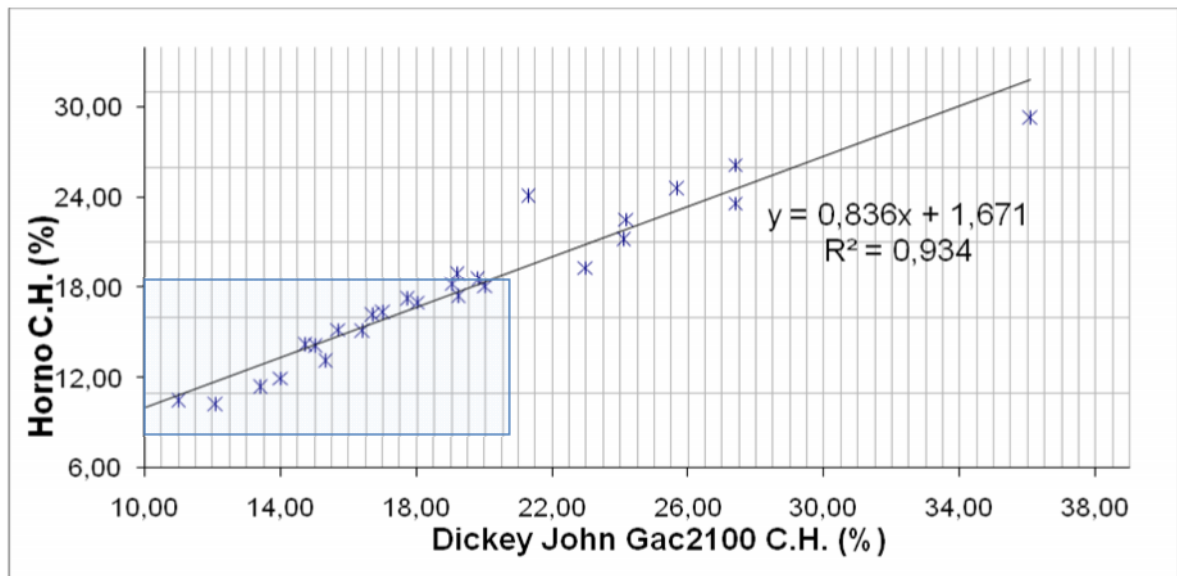
Para el medidor Dickey John se tiene la tabla 13, la cual es un resumen de los tipos de ajuste matemático aplicados para estos datos, la ecuación y el coeficiente de correlación, de modo que el mejor ajuste es un polinomio de 3^{er} grado el cual tiene una ecuación y: $-0,001x^3 + 0,054x^2 - 0,038x + 5,501$ y un coeficiente de correlación $R^2: 0,95$.

Tabla 13 Ajustes matemáticos realizados entre las mediciones del Horno y el Dickey-John Gac 2100 en frijol negro Guaymí

Tipo de ajuste	Ecuación Curva ajuste	R ²
Ajuste exponencial	Y : 6,532e ^{0,049x}	0,89
Ajuste lineal	Y : 0,836x + 1,671	0,93
Ajuste logarítmica	Y : 14,75ln(x) - 25,09	0,91
Ajuste polinomio 2 ^{do} grado	Y : -0,008x ² + 1,201x - 1,728	0,94
Ajuste polinomio 3 ^{er} grado	y : -0,001x ³ + 0,054x ² - 0,038x + 5,501	0,95
Ajuste potencial	Y : 1,202x ^{0,911}	0,94

En el gráfico 15 se tiene la distribución para frijol negro del mismo medidor, en el cual se observa mayor dispersión entre métodos para contenidos mayores a 18 %.

Gráfico 15. Medición del contenido de humedad para el frijol negro Guaymí con el medidor Dickey-John Gac 2100 en función del Horno. Ajuste lineal.



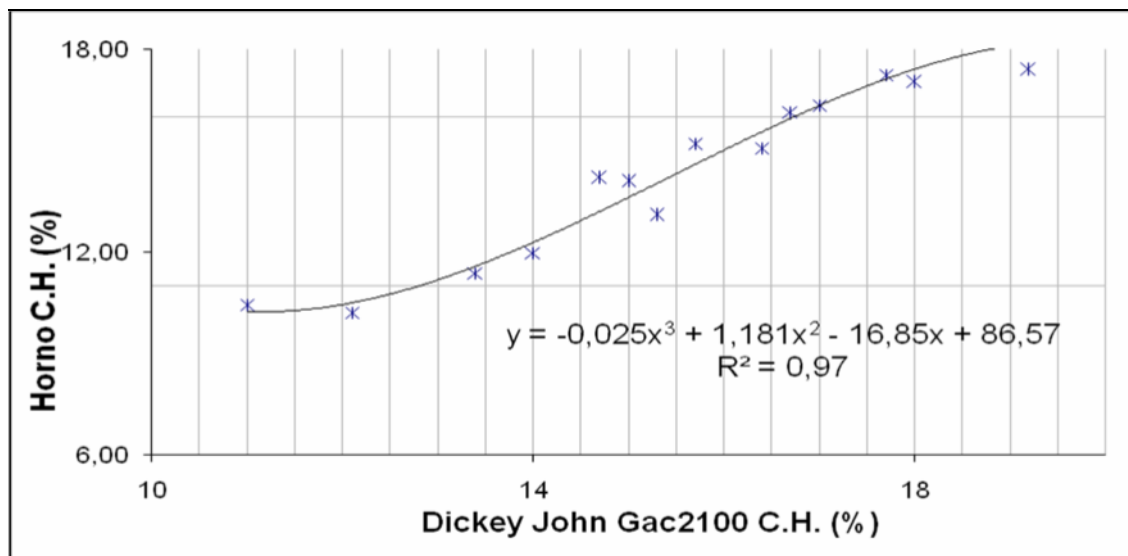
Por otro lado realizando los ajustes matemáticos para el área sombreada (rango seleccionado) del gráfico anterior, se tiene la tabla 13.1, donde se puede notar una mejoría en los ajustes

tes, por lo tanto la ecuación que representa el mejor ajuste es $y: -0,025x^3 + 1,181x^2 - 16,85x + 86,57$ con un coeficiente de correlación $R^2: 0,97$ lo cual se muestra en el gráfico 15.1.

Tabla 13.1 Ajustes matemáticos realizados entre las mediciones para el área sombreada del Horno y el Dickey-John Gac 2100 en frijol negro Guaymí

Tipo de ajuste	Ecuación Curva ajuste	R ²
Ajuste exponencial	$y : 4,578e^{0,072x}$	0,94
Ajuste lineal	$y : 1,032x - 1,691$	0,95
Ajuste logarítmica	$y : 15,96\ln(x) - 29,19$	0,94
Ajuste polinomio 2 ^{do} grado	$y : -0,010x^2 + 1,363x - 4,245$	0,95
Ajuste polinomio 3 ^{er} grado	$y : -0,025x^3 + 1,181x^2 - 16,85x + 86,57$	0,97
Ajuste potencial	$y : 0,654x^{1,124}$	0,94

Gráfico 15.1. Medición del contenido de humedad para el frijol negro Guaymí con el medidor Dickey-John Gac 2100 en función del Horno. Ajuste polinomio tercer grado.



En el caso del medidor Grainman en la tabla 14 se resumen los tipos de ajuste matemáticos aplicados al gráfico, la ecuación y el coeficiente de correlación, el mejor ajuste obtenido es

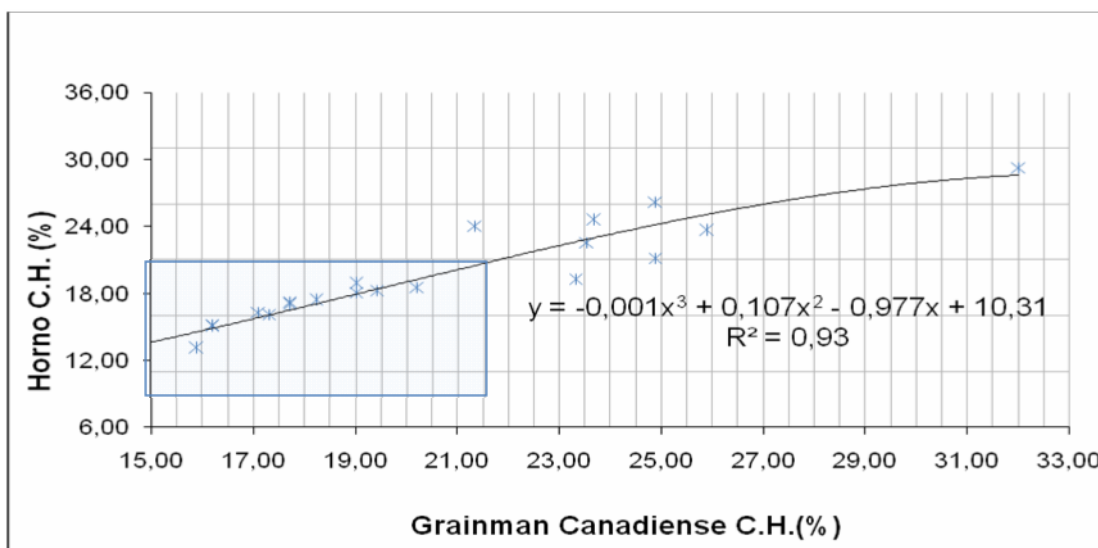
un polinomio de 3^{er} grado representada por la ecuación $y = -0,001x^3 + 0,107x^2 - 0,977x + 10,31$ y un coeficiente de correlación de R²: 0,93.

Tabla 14 Ajustes matemáticos realizados entre las mediciones del Horno y el Grainman en frijol negro Guaymí

Tipo de ajuste	Ecuación Curva ajuste	R ²
Ajuste exponencial	$y : 5,885e^{0,056x}$	0,91
Ajuste lineal	$y : 0,932x + 0,196$	0,92
Ajuste logarítmica	$y : 14,38\ln(x) - 23,85$	0,82
Ajuste polinomio 2 ^{do} grado	$y : 0,002x^2 + 0,835x + 1,028$	0,92
Ajuste polinomio 3 ^{er} grado	$y : -0,001x^3 + 0,107x^2 - 0,977x + 10,31$	0,93
Ajuste potencial	$y : 1,251x^{0,901}$	0,88

En el grafico 16 se tiene la distribución para frijol negro del Grainman en función del horno, existe una mayor dispersión para contenidos de humedad mayores al 20 %; por debajo del valor hay menos dispersión entre métodos.

Grafico 16. Medición del contenido de humedad para el frijol negro Guaymí con el medidor Grainman en función del Horno. Ajuste polinomio tercer grado.

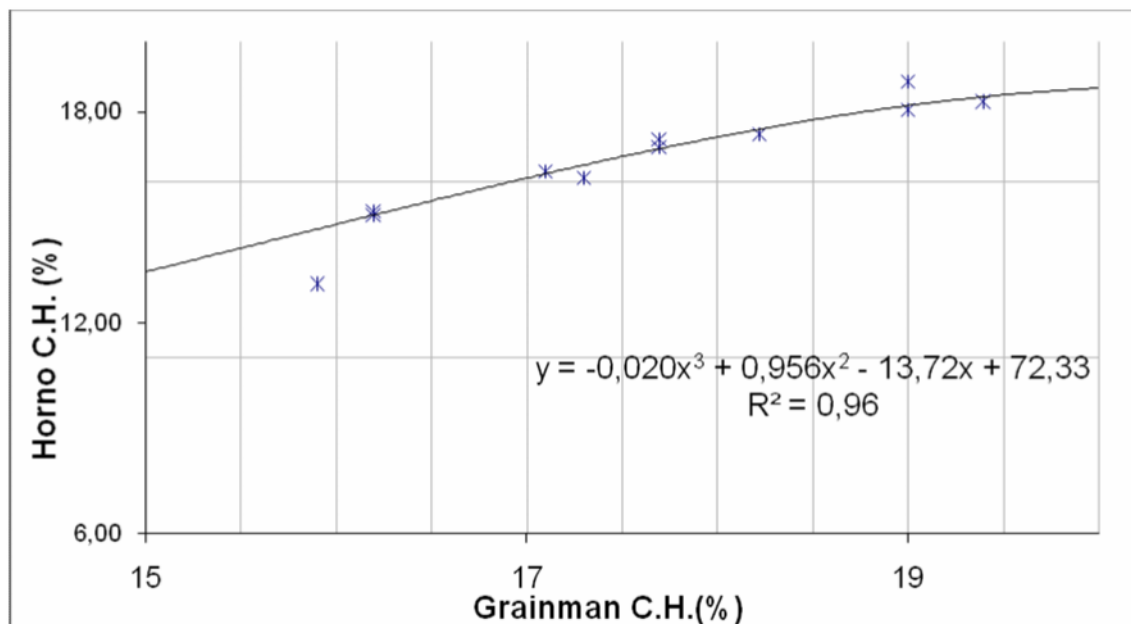


Realizando los ajustes matemáticos para el área sombreada, se tiene la tabla 14.1, donde se puede notar que los ajustes mejoraron, de modo que el mejor ajuste sigue siendo el polinomio 3^{er} grado con una ecuación $y: -0,020x^3 + 0,956x^2 - 13,72x + 72,33$ y un coeficiente de correlación $R^2: 0,96$, representado en el gráfico 16.1.

Tabla 14.1 Ajustes matemáticos realizados entre las mediciones para el área sombrada del Horno y el Grainman en frijol negro Guaymí

Tipo de ajuste	Ecuación Curva ajuste	R ²
Ajuste exponencial	$y : 4,235e^{0,076x}$	0,94
Ajuste lineal	$y : 1,097x - 2,781$	0,95
Ajuste logarítmica	$y : 17,00\ln(x) - 32,15$	0,95
Ajuste polinomio 2 ^{do} grado	$y : -0,005x^2 + 1,260x - 4,040$	0,95
Ajuste polinomio 3 ^{er} grado	$y : -0,020x^3 + 0,956x^2 - 13,72x + 72,33$	0,96
Ajuste potencial	$y : 0,529x^{1,199}$	0,95

Gráfico 16.1. Medición del contenido de humedad para el frijol negro Guaymí con el medidor Grainman en función del Horno. Ajuste polinomio tercer grado.

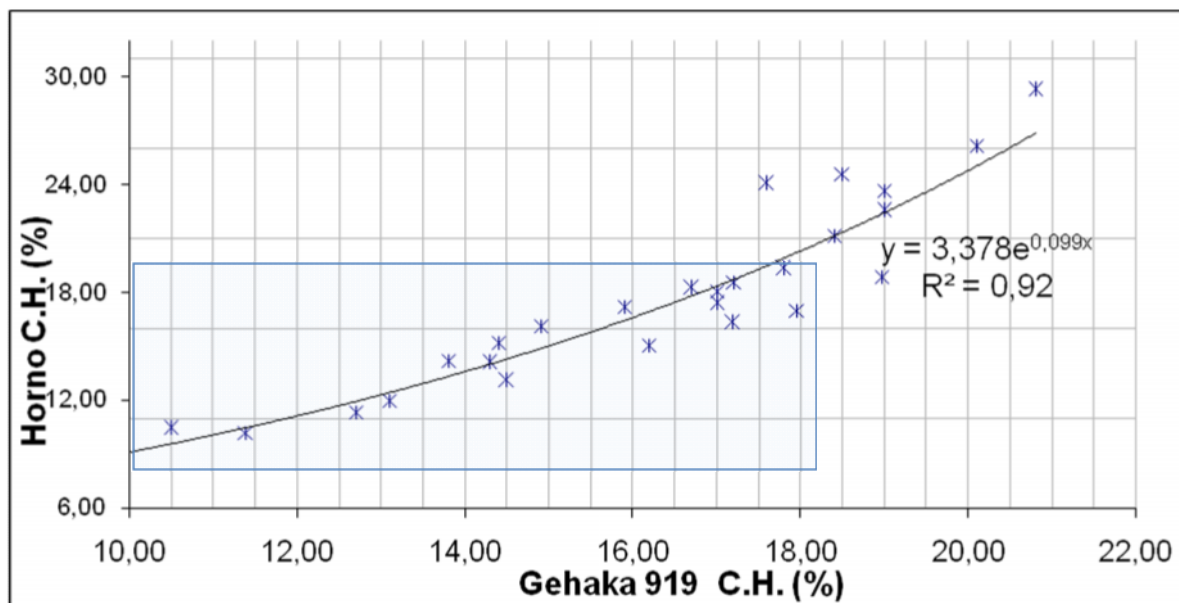


Para el medidor Gehaka se tiene la tabla 15 con el resumen de los tipos de ajuste matemáticos, la ecuación y el coeficiente de correlación, la curva exponencial es el mejor ajuste que se puede lograr representado por la ecuación $y = 3,378e^{0,099x}$ y un coeficiente de correlación $R^2: 0,92$, el cual se aprecia en el gráfico 17 donde se tiene la distribución para frijol negro en el medidor Gehaka 919 en función del horno, se observa que la dispersión es más homogénea entre métodos, para valores mayores 18 % C.H aumenta la dispersión entre los valores.

Tabla 15 Ajustes matemáticos realizados entre las mediciones del Horno y el Gehaka 919 en frijol negro Guaymí

Tipo de ajuste	Ecuación Curva ajuste	R ²
Ajuste exponencial	$y = 3,378e^{0,099x}$	0,92
Ajuste lineal	$y = 1,581x - 7,863$	0,86
Ajuste logarítmica	$y = 21,98\ln(x) - 43,07$	0,80
Ajuste polinomio 2 ^{do} grado	$y = 0,108x^2 - 1,668x + 15,27$	0,90
Ajuste polinomio 3 ^{er} grado	$y = 0,011x^3 - 0,412x^2 + 5,908x - 20,03$	0,90
Ajuste potencial	$y = 0,341x^{1,411}$	0,90

Gráfico 17. Medición del contenido de humedad para el frijol negro Guaymí con el medidor Gehaka 919 en función del Horno. Ajuste exponencial.

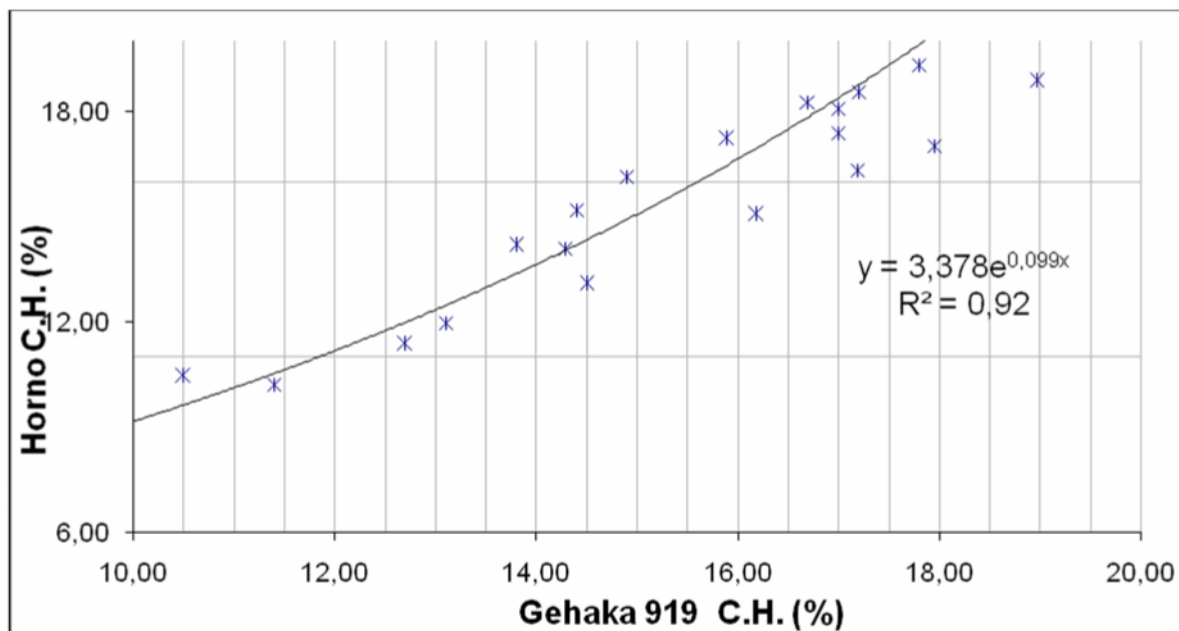


Del mismo modo realizando los ajustes matemáticos para el área sombreada, se tiene la tabla 15.1, donde se puede notar que los ajustes se mantuvieron igual de manera que se usa el ajuste exponencial con la ecuación $y = 3,378e^{0,099x}$ y un coeficiente de correlación $R^2: 0,92$, como se muestra en el gráfico 17.1.

Tabla 15.1 Ajustes matemáticos realizados entre las mediciones para el área sombreada del Horno y el Gehaka 919 en frijol negro Guaymí

Tipo de ajuste	Ecuación Curva ajuste	R^2
Ajuste exponencial	$y : 3,378e^{0,099x}$	0,92
Ajuste lineal	$y : 1,581x - 7,863$	0,86
Ajuste logarítmica	$y : 21,98\ln(x) - 43,07$	0,80
Ajuste polinomio 2 ^{do} grado	$y : 0,108x^2 - 1,668x + 15,27$	0,90
Ajuste polinomio 3 ^{er} grado	$y : 0,011x^3 - 0,412x^2 + 5,908x - 20,03$	0,90
Ajuste potencial	$y : 0,341x^{1,411}$	0,90

Gráfico 17.1. Medición del contenido de humedad para el frijol negro Guaymí con el medidor Gehaka 919 en función del Horno. Ajuste exponencial.



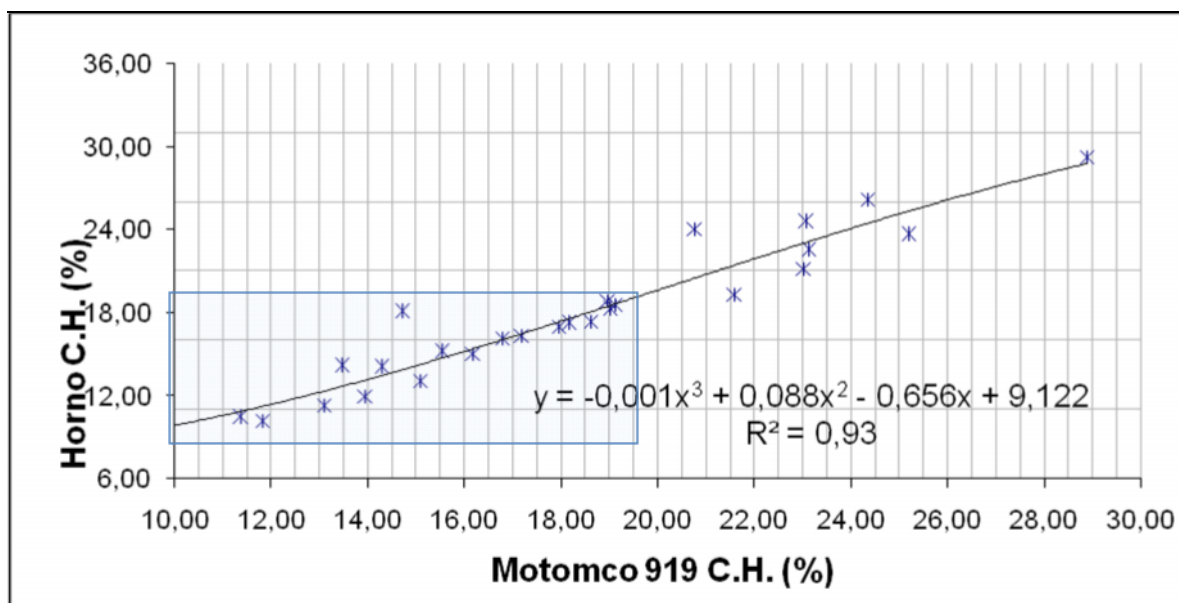
En el caso del medidor Motomco se tiene la tabla 16, con el resumen de los tipos de ajuste matemáticos, la ecuación y el coeficiente de correlación, resultando el mejor ajuste un polinomio de tercer grado con una ecuación $y : -0,001x^3 + 0,088x^2 - 0,656x + 9,122$ y coeficiente de correlación $R^2: 0,93$.

Tabla 16 Ajustes matemáticos realizados entre las mediciones del Horno y el Motomco 919 en frijol negro Guaymí.

Tipo de ajuste	Ecuación Curva ajuste	R2
Ajuste exponencial	$y : 5,676e^{0,060x}$	0,91
Ajuste lineal	$y : 0,998x - 0,308$	0,92
Ajuste logarítmica	$y : 14,80\ln(x) - 24,52$	0,83
Ajuste polinomio 2 ^{do} grado	$y : 0,012x^2 + 0,560x + 3,239$	0,92
Ajuste polinomio 3 ^{er} grado	$y : -0,001x^3 + 0,088x^2 - 0,656x + 9,122$	0,93
Ajuste potencial	$y : 1,191x^{0,930}$	0,89

En el gráfico 18, de la misma manera que a los otros equipos de medición, también se observa una dispersión para contenidos de humedad mayores a 18 % y por debajo de ese valor hay menos dispersión entre métodos.

Grafico 18. Medición del contenido de humedad para el frijol negro Guaymí con el medidor Motomco 919 en función del Horno. Ajuste polinomio tercer grado.

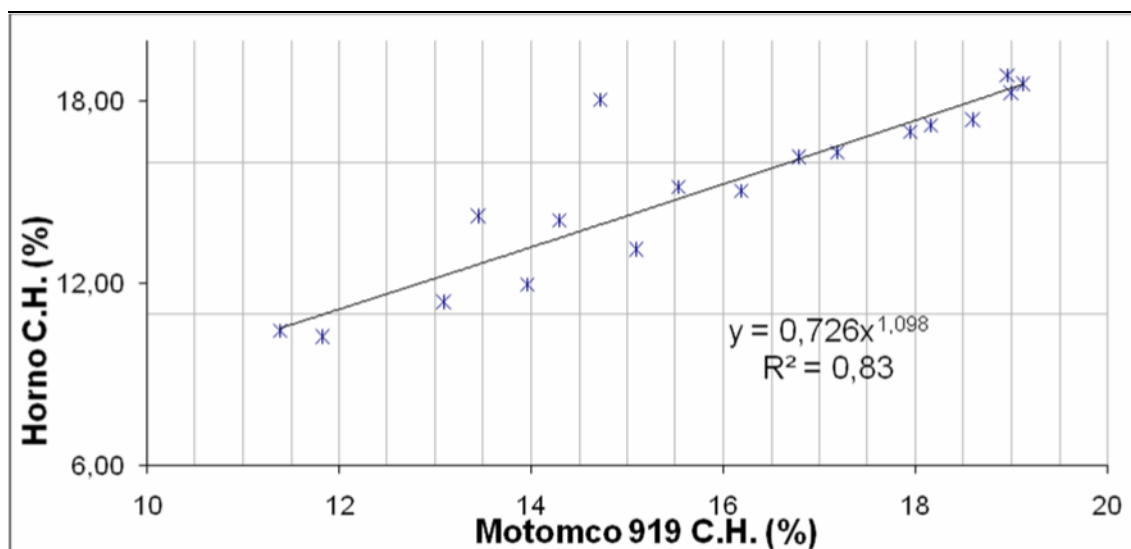


Luego de los ajustes matemáticos para el área sombreada se tiene la tabla 16.1, de la cual se tiene que el mejor ajuste es potencial con una ecuación $y = 0,726x^{1,098}$ y un coeficiente de correlación $R^2: 0,83$, como se muestra en el gráfico 18.1.

Tabla 16.1 Ajustes matemáticos realizados entre las mediciones para el área sombreada del Horno y el Motomco 919 en frijol negro Guaymí.

Tipo de ajuste	Ecuación Curva ajuste	R ²
Ajuste exponencial	$y = 4,831e^{0,071x}$	0,81
Ajuste lineal	$y = 1,013x - 0,869$	0,82
Ajuste logarítmica	$y = 15,55\ln(x) - 27,61$	0,82
Ajuste polinomio 2 ^{do} grado	$y = -0,041x^2 + 2,315x - 10,76$	0,82
Ajuste polinomio 3 ^{er} grado	$y = 0,019x^3 - 0,955x^2 + 16,06x - 78,62$	0,83
Ajuste potencial	$y = 0,726x^{1,098}$	0,83

Gráfico 18.1. Medición del contenido de humedad para el frijol negro Guaymí con el medidor Motomco 919 en función del Horno. Ajuste potencial.



5.7 Análisis con la norma OIML R59 para el frijol negro Guaymí.

De la misma forma que se analizó para el frijol rojo, en la tabla 2 se tiene el máximo error permisible MEP y los requerimientos en precisión, repetitividad y reproducibilidad para poder valorar a cada medidor esta vez para frijol negro; teniendo como resultado la tabla 17 para dicho grano, estos datos son los parámetros que deben cumplir cada medidor.

Tabla 17. Parámetros en precisión, repetibilidad y reproducibilidad para los medidores según la recomendación OIMLR59 para el frijol negro según MEP obtenido.

Promedio MEP	y SDD 0,05xMEP	SD 0,25xMEP	SDD ₁ 0,3xMEP
0,7	0,36	0,18	0,21

De manera que para una precisión SDD se tiene que cumplir con un valor no mayor a 0,36 %, para repetibilidad SD un valor no mayor a 0,18 % y reproducibilidad SDD1 un valor no mayor a 0,21 %.

Para el cálculo de la **precisión** \bar{Y} y SDD, utilizando las formulas (5) y (6) respectivamente, se tiene como resultado para cada medidor con respecto al horno la tabla 18; donde se puede apreciar que el medidor Gehaka tiene la menor desviación estándar SDD: 0,48% entre sus mediciones con respecto al horno, pero no cumple con el 0,36 % requerido (tabla 17) y el equipo con mayor desviación estándar es el medidor Dickey-John con una SDD: 0,66% , tampoco cumplen los medidores Grainman con un valor SDD de 0,66 % y Motomco con un SDD: 0,79 %.

Tabla 18. Resumen de \bar{Y} y SDD obtenidos para la precisión de cada equipo para frijol negro.

	Dickey-John Gac2100	Grainman	Gehaka 919	Motomco 919
\bar{Y}	1,16	1,18	0,91	1,12
SDD	0,66	0,66	0,48	0,79

Para el cálculo de la repetibilidad SD se usó la fórmula 7, los resultados para cada equipo se muestran en la tabla 19. Todos los equipos están por debajo del parámetro según la norma, lo que indica que todos cumplen lo requerido, de modo que sus mediciones son repetibles para una misma muestra.

Tabla 19 Resumen de SD obtenidos para la repetibilidad de cada equipo para frijol negro.

	Dickey-John Gac2100	Grainman	Gehaka 919	Motomco 919
SD	0,05	0,16	0,00	0,00

Por otro lado para el cálculo de la reproducibilidad SDD_1 entre equipos, se tiene la fórmula (8) y los resultados se muestran en la tabla 20. Ninguno cumple con el SDD_1 : 0,21 %. La menor diferencia de desviación estándar entre equipos está entre el Grainman y Dickey John con un valor de SDD_1 : 0,29 % y la mayor diferencia está entre el Gehaka y el Motomco con un SDD_1 :1,00 %.

Tabla 20 .Resumen de SD1 obtenidos para la reproducibilidad entre equipos indirectos para frijol negro.

	Dickey- John y Grainman	Dickey- John y Motomco	Dickey- John y Ge- haka	Grainman y Gehaka	Grainman y Motomco	Gehaka y Motomco
SDD_1	0,29	0,81	0,91	0,97	0,98	1,00

5.8 Comparación de resultados entre ambas variedades de frijol.

- Como se puede apreciar en el grafico 2 y grafico 11 para el Dickey John Gac2100 ambos presentan comportamientos diferentes, para el primero en frijol rojo el medidor subestima las mediciones y para frijol negro por el contrario sobrestima las mediciones con respecto al método de referencia, lo cual también se puede apreciar en los gráficos 20 y 21 (ver anexo B) para frijol rojo y negro respectivamente⁵.
- Comparando los gráficos de control 3 y 12 para el Grainman para frijol rojo y frijol negro respectivamente, en ambos se tiene una subestimación de las mediciones, pero para el frijol rojo es más variable la diferencia lo cual también se puede apreciar en los gráficos 21 y 25 (ver anexo B) para frijol rojo y negro respectivamente, donde se puede notar este comportamiento para cada variedad que se estudió.
- Para el Gehaka en el gráfico 4 en frijol rojo el medidor mantiene a lo largo de todos los puntos las diferencias dentro de la tolerancia definida lo cual se puede también apreciar el grafico 22 (ver anexo B), donde muchos puntos están cerca del método al horno, por el contrario para frijol negro en el gráfico 13 hay mucha dispersión entre los métodos, muchos están fuera del rango de tolerancia, lo cual se puede notar en el grafico 26 (ver anexo B) donde algunas diferencias están por debajo y otras están por arriba del método del horno.
- Comparando los gráficos 5 y 14 de control para frijol rojo y frijol negro respectivamente para el Motomco 919, el equipo mide el contenido de humedad para cada variedad de forma diferente, como se puede apreciar en el grafico 23 (ver anexo B), para el grano rojo el equipo tiene diferencias por debajo del método al horno de manera muy discontinua y para el grano negro según el grafico 27 (ver anexo B), hay también

⁵ En este tipo de gráfico se presentan solo las diferencias con respecto al eje x como el método de referencia.

mucha variación entre mediciones pero se presenta tanto por arriba como por abajo del valor real.

- Comparando los resultados de las tablas 5, 6 y 7 de los equipos para frijol rojo y los requerimientos en precisión, repetibilidad y reproducibilidad de las normas utilizadas en la tabla 3; se tiene que en precisión con respecto al horno solo el Gehaka cumple con la tolerancia definida. En repetibilidad para un mismo equipo todos los medidores cumplen los requerimientos mínimos, sus mediciones entre sí son estables. Para la reproducibilidad entre equipos, ninguno cumple con los requerimientos mínimos.
- Para frijol negro comparando los resultados de las tablas 10, 11 y 12 de los equipos y los requerimientos en precisión, repetibilidad y reproducibilidad de la tabla 9 de las normas; se tiene que en precisión con respecto al horno ningún medidor está dentro de la tolerancia. En repetibilidad para un mismo equipo todos cumplen los requerimientos mínimos de tolerancia, sus mediciones entre sí son estables. En el caso de reproducibilidad entre equipos ninguno cumple con los requerimientos mínimos de tolerancia.

CAPÍTULO 6. Consideraciones finales y recomendaciones.

6.1 Consideraciones finales.

- Existen diferencias para cada variedad de frijol en la medición del contenido de humedad para los diferentes equipos de medición indirecta utilizados.
- Hay mucha dispersión entre las mediciones del contenido de humedad realizadas en los medidores con respecto al método al horno.
- Los gráficos del contenido de humedad de los equipos indirectos en función del horno, demuestran una menor dispersión para los valores comprendidos dentro del rango seleccionado (entre 10 % y 18 % C.H), sin embargo para valores tanto por encima como por debajo de estos puntos las mediciones son menos confiables.
- Para frijol rojo de la variedad Cabécar el medidor Gehaka, reporta la mayor cantidad de valores de contenido de humedad que están dentro de las tolerancias de la norma OIML R59, por otro lado el medidor Grainman es el segundo que reporta mas valores dentro de las tolerancias, pero solo para valores comprendidos entre 15 y 20 % C.H.
- Para frijol negro de la variedad Guaymí el medidor Dickey John, reporta la mayor cantidad de valores del contenido de humedad que están dentro de las tolerancias de la norma OIML R59, seguido por el Gehaka y el Motomco con 2 mediciones menos dentro de las tolerancias, por otro lado el medidor Grainman es el que reporta la mayor cantidad de mediciones fuera de las tolerancias. Sin embargo, ninguno de los medidores cumplen con los parámetros de precisión según establece la norma.

- Según los resultados de reproducibilidad, los medidores indirectos analizados demuestran dispersión entre ellos, por lo tanto no son comparables entre sí.
- De los resultados se concluye que el parámetro de repetibilidad según la norma se cumple para todos los equipos en ambas variedades de frijol, las mediciones de cada equipo son repetibles.
- Se confirma en este trabajo lo establecido en investigaciones anteriores que existe dispersión entre métodos para la determinación del contenido de humedad de grano nacional.

6.2 Fuentes de error en los valores de contenido de humedad.

- Las variedades y condiciones de los granos que los fabricantes utilizaron para generar las tablas y curvas de medición de contenido de humedad, no corresponden precisamente a las utilizadas en el estudio, por lo cual es probable que los medidores reporten valores distintos de contenido de humedad con respecto al real.
- Estos medidores son operados por varios analistas en el laboratorio que no siguen el manual de operación de los mismos, provocando un uso desigual y posibles errores de manipulación, de forma tal que existe la posibilidad de que los equipos midan con más distorsiones los valores de contenido de humedad o se desajusten internamente.
- En el momento de las pruebas había una remodelación del edificio del laboratorio, por lo cual los equipos fueron ubicados en distintos sitios para evitar su daño, razón que contribuye a un posible desajuste del sistema interno de los medidores.

- Los medidores no tienen reguladores de voltaje, por lo cual es probable que si no operan en el voltaje adecuado los dispositivos internos no midan adecuadamente el contenido de humedad del grano.

6.3 Recomendaciones.

- Implementar la aplicación de las normas internacionales referidas, para la utilización de equipos de medición del contenido de humedad a nivel gubernamental o entes oficiales que tiene injerencia en el proceso de comercialización y verificación de calidad de granos.
- En relación con la calibración de los equipos es importante desarrollar curvas del contenido de humedad para granos nacionales, con el fin de contar con equipos calibrados según éstas para nuestras condiciones, utilizando las recomendaciones de las normas internacionales, asegurando la homologación de criterios y la confiabilidad.
- Es necesario realizar muestreos con las mismas variedades sembradas en la región Huetaar norte, para analizar si existe diferencia con los resultados obtenidos.
- Realizar mediciones a otras variedades de frijol para ver si hay tanta dispersión entre metodologías de medición de contenido de humedad.
- Es necesario contar en el laboratorio con registros de control de los equipos y con personal capacitado, para un adecuado uso de los mismos.
- Operar los equipos con reguladores de voltaje para evitar distorsiones y daños eléctricos que provocan alteraciones en los componentes de los medidores.

- Contar con una muestra inerte higroscópicamente, para realizar pruebas de verificación en los medidores de contenido de humedad y controlar posibles desajustes de los mismos.
- Revisión del parámetro usado en la incertidumbre de medición de contenido de humedad para el grano de arroz, el cual es 0,5 % según el reglamento nacional (para frijol no está definido) y como lo recomienda las normas internacionales usadas es de 0,8 % entre C.H. 6 % a 18 % C.H. y aumenta para C.H. mayores a 18 %.
- No es recomendable comparar entre sí diferentes medidores de contenido de humedad.
- Este estudio no pretende calificar marcas, pretende dar una referencia del estado y comportamiento de algunos equipos utilizados en el país, para la medición del contenido de humedad del grano, bajo una normativa internacional, que permita el desarrollo de nuevas investigaciones para lograr mejoras.

CAPÍTULO 7. BIBLIOGRAFÍA

7.1 Artículos de revistas.

1. Alizaga, R. “Efecto de la temperatura de secado y del contenido de humedad durante el almacenamiento sobre la calidad de la semilla de frijol”. Artículo de investigación extraído de *Agronomía costarricense* 1985, Extraído de http://www.mag.go.cr/rev_agr/v09n02_165.pdf
2. Jiménez; Zeledón y Alizaga ,R. “Relación de equilibrio entre el contenido de humedad de almendras de la palma aceitera (*Elaeis guineensis*) producida en Costa Rica y la humedad relativa del aire” 1995 *ASD Oil Palm Boletín* N° 10, 16-26, Artículo de investigación tomado de www.asd-cr.com/paginas/.../publicaciones_en_linea.html
3. López, M. “Evaluación de un medidor de contenido de humedad en granos basado en el principio de capacitancia eléctrica”. Centro Nacional de Metrológica, División de termometría, CENAM. Artículo de investigación. El Marques, México.2006. Tomado de: www.cenam.mx/.../Propiedades%20Termofisicas%20y%20Humedad/A5-2.pdf
4. Luz, M. “Medidores de humedad.” Revista internacional de semillas .SEEDNEWS. Tomado de http://www.seednews.inf.br/espanhol/seed61/artigocapa61_esp.shtml

7.2 Libros.

5. Alizaga, R. “Medición del contenido de en granos básicos con el determinador Motomco modelo 919” Tesis presentada a la faculta de Agronomía como requisito para optar al grado de Licenciado en Fitotecnia Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica, 1981.

6. Mazon, B. “Calibración de Equipos para la determinación de humedad en granos de interés nacional”. Tesis para ser presentada a la Facultad de Ingeniería como requisito para optar al grado de Licenciatura en Ingeniería Agrícola. Facultad de Ingeniería Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica, 2007.
7. A.A.C.C. “Método 44-15 A”. American Association of Cereal Chemists. St. Paul, Minnesota, 1999.
8. SEPSA/FAO. Proyecto: “Desarrollo de la capacidad técnica para la evaluación de la competitividad de los productos agropecuarios y los efectos de la apertura comercial”: Estudio de Competitividad del Frijol en Costa Rica con la Metodología de la Matriz de Análisis De Política (MAP). Costa Rica. 2006.
9. Henderson, M; Perry, R.. “Agricultural Process Engineering”. Tercera Edición. Wesport, Conneticut, The avi Publishing Company Inc. 1981. p303
10. Hernandez, F; Araya, R. “Manual de recomendaciones técnicas cultivo de frijol”. San José, Costa Rica, 2007.

7.3 Páginas web.

11. USDA, Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. “Moisture Hadbook”. Washington, 1999. Tomado de:
archive.gipsa.usda.gov/reference.../handbooks/moisture/mhb-ch2.pdf
12. Greid, D; Reeves, M. “Prevención de perdidas de alimentos poscosecha: manual de capacitación” Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación, FAO. Roma, Italia. 1985.
Formato tomado de: <http://www.fao.org/docrep/X5037S/X5037S00.HTM>

13. Agrichem Inc “Grain Moisture Measurement with Capacitance Type Devices”. 1997. Tomado de: www.agricheminc.com/pdfs/feedgrain297.pdf
14. Grain Inspection, Packers and Stockyards Administration. Federal Grain Inspection Service “Calibración Oficial para el Dickey-John Gac 2100”. U.S.A. 2010, Tomado de: <http://archive.gipsa.usda.gov/reference-library/directives/9180-61.pdf>
15. NIST Handbook 44 - 2008 Edition “Specifications, Tolerances, and Other Technical Requirements for Weighing and Measuring Devices” as adopted by the 92nd National Conference on Weights and Measures 2007. Seccion 5.56 NIST United States Department of Commerce. USA. 2008. Tomado de: <http://ts.nist.gov/WeightsAndMeasures/Publications/H44-08.cfm>
16. Fourth Committee Draft Revision International “Recommendation 59 Moisture Meters for Cereal Grain and Oilseeds”, International Organization of Legal Metrology, OIML R59. Secretaría China, Julio 2006 Tomado de: www.keikoren.or.jp/oiml/20090611-7_en.pdf
17. Constantinos E. “Prueba Q de Dixon”. Laboratory of Analytical Chemistry Department of Chemistry National and Kapodistrian. Universidad de Atenas. Grecia Tomado de: http://www.chem.uoa.gr/applets/AppletQtest/Appl_Qtest2.html

CAPÍTULO 8. ANEXOS.

8.1 ANEXO A
Contenidos de humedad obtenidos.

8.1.1 Contenidos de humedad para frijol rojo Cabécar .

Tabla 21. Clase y distribución para intervalos de 1 % de contenido de humedad para frijol rojo Cabécar.

Clase	Frecuencia
6	0
7	1
8	0
9	0
10	1
11	0
12	4
13	6
14	5
15	7
16	5
17	7
18	6
19	1
20	3
21	0
22	2
23	1
24	2
25	2
26	0
27	1
28	0
29	0
30	1
6	0
7	1
8	0
9	0
10	1
11	0
12	4
13	6

Tabla 22. Diferencias de los valores obtenidos por el horno menos los obtenidos en cada equipo para frijol rojo, con la mayor y menor diferencia entre métodos para los puntos entre 10 a 18 % C.H.

Horno C.H. (%)	Dickey John	Grainman Canadiense	Gehaka 919	Motomco 919	Horno C.H. (%)	Dickey John	Grainman Canadiense	Gehaka 919	Motomco 919
29,17	-5,43	1,97	6,97	1,66	14,89	-1,71	-1,09	-0,01	-1,42
26,37	-6,73	0,33	4,97	1,60	14,63	-1,47	-1,12	-0,07	-1,48
24,86	-2,24	-0,50	4,36	3,08	14,47	-2,63	-2,43	-1,33	-2,74
24,22	-5,98	-0,26	3,82	1,28	14,05	-1,09	-1,31	0,21	-1,69
23,61	-12,19	-3,86	2,11	-0,87	13,75	-1,16	-1,01	-0,06	-1,51
23,49	-4,21	-0,73	2,89	1,15	13,45	-2,15	-1,82	-0,95	-2,45
22,93	-3,27	-0,50	3,53	1,14	13,39	-1,95	-1,68	-0,75	-2,31
21,91	-2,89	2,14	2,81	1,72	13,30	-1,45	-1,50	-0,35	-1,47
21,69	-7,91	-3,43	1,29	-0,52	13,24	-1,91	-1,61	-0,61	-2,37
19,52	-2,28	0,91	1,22	0,50	12,88	-1,20	-0,32	0,00	-0,42
19,17	-5,83	0,30	1,17	-0,08	12,63	-1,36	-1,77	-0,06	-1,90
18,33	-3,57	-1,20	0,43	-1,20	12,43	-1,52	-1,81	-0,42	-2,32
17,69	-3,81	-0,52	0,19	-1,59	12,34	-0,77	-1,23	-0,07	-1,23
17,62	-2,28	-0,90	0,32	-0,90	12,27	-1,27	-1,48	-0,07	-1,62
17,61	-1,69	-0,26	0,61	-0,94	12,17	-1,56	-1,86	0,14	-1,86
17,36	-2,34	-0,98	0,46	-0,98	11,84	-0,93	-1,26	-0,13	-1,54
17,32	-2,28	-1,41	0,12	-1,67	11,76	-1,63	-1,27	-0,43	-1,74
16,83	-3,97	-1,24	-0,57	-1,54	11,54	-1,16	-1,22	0,04	-1,22
16,80	-1,60	-0,95	0,20	-1,08	11,15	-1,54	-1,26	-0,34	-1,82
16,58	-1,52	-0,82	0,18	-1,07	9,67	-1,26	-2,18	0,14	-1,90
16,52	-1,48	-0,90	0,42	-1,28	6,86	-0,95	-1,03	0,05	-1,62
16,34	-2,36	-2,00	0,64	-2,00	Máximo	-3,97	-2,43	-1,37	-2,74
16,27	-0,93	-0,60	0,27	-1,10	Minino	-0,74	-0,26	0,64	-0,42
16,16	-0,74	-0,60	0,36	-1,10					
15,91	-3,39	-1,64	-0,89	-1,77					
15,74	-1,26	-0,39	0,64	-1,14					
15,57	-1,13	-1,11	-0,13	-1,36					
15,55	-1,35	-0,88	0,55	-1,26					
15,03	-3,17	-1,75	-1,37	-2,38					
14,93	-2,37	-1,79	-0,87	-2,11					

8.1.2 Contenidos de humedad para frijol negro Guaymí.

Tabla 23. Clase y distribución para intervalos de 1 % de contenido de humedad para frijol negro Guaymí

Clase	Frecuencia
6	0
7	0
8	0
9	2
10	0
11	2
12	2
13	0
14	1
15	2
16	2
17	2
18	3
19	4
20	1
21	0
22	1
23	1
24	1
25	2
26	0
27	1
28	0
29	0
30	1

Tabla 24. Diferencias de los valores obtenidos por el horno menos los obtenidos en cada equipo para frijol negro, con la mayor y menor diferencia entre métodos para los puntos entre 10 a 18 % C.H.

Horno C.H.	Dickey-John GAC® 2100	Grainman	Gehaka 919	Motomco 919
29,26	-6,84	-2,77	8,46	0,37
26,17	-1,23	1,27	6,07	1,82
24,57	-1,13	0,88	6,07	1,48
24,05	2,75	2,70	6,45	3,27
23,63	-3,77	-2,28	4,63	-1,57
22,53	-1,67	-1,02	3,53	-0,60
21,16	-2,94	-3,72	2,76	-1,88
19,31	-3,69	-4,01	1,51	-2,29
18,87	-0,33	-0,13	-0,10	-0,10
18,55	-1,25	-1,65	1,35	-0,57
18,26	-0,74	-1,14	1,56	-0,75
18,07	-1,93	-0,93	1,07	3,35
17,37	-1,83	-0,85	0,37	-1,24
17,22	-0,48	-0,48	1,32	-0,94
17,01	-0,99	-0,69	-0,94	-0,94
16,32	-0,68	-0,78	-0,87	-0,87
16,14	-0,56	-1,16	1,24	-0,65
15,19	-0,51	-1,01	0,79	-0,34
15,06	-1,34	-1,14	-1,13	-1,13
14,19	-0,51	-0,71	0,39	0,73
14,09	-0,91	-0,81	-0,20	-0,20
13,08	-2,22	-2,82	-1,42	-2,01
11,97	-2,03	-1,93	-1,13	-1,99
11,36	-2,04	-1,94	-1,34	-1,74
10,44	-0,56	-0,96	-0,06	-0,94
10,21	-1,89	-2,09	-1,19	-1,61
8,77	1,47	2,87	-0,33	2,60
8,63	-0,47	-1,87	-1,17	-0,78
Máximo	-2,22	-2,82	1,56	3,35
Mínimo	-0,33	-0,13	-0,06	-0,10

8.2 ANEXO B
Gráficos de contenido de humedad

8.2.1 Gráficos de contenido de humedad para frijol rojo Cabécar.

Gráfico 19. Diferencias del contenido de humedad (%) de los medidores en función de las tolerancias a lo largo de cada contenido de humedad obtenido.

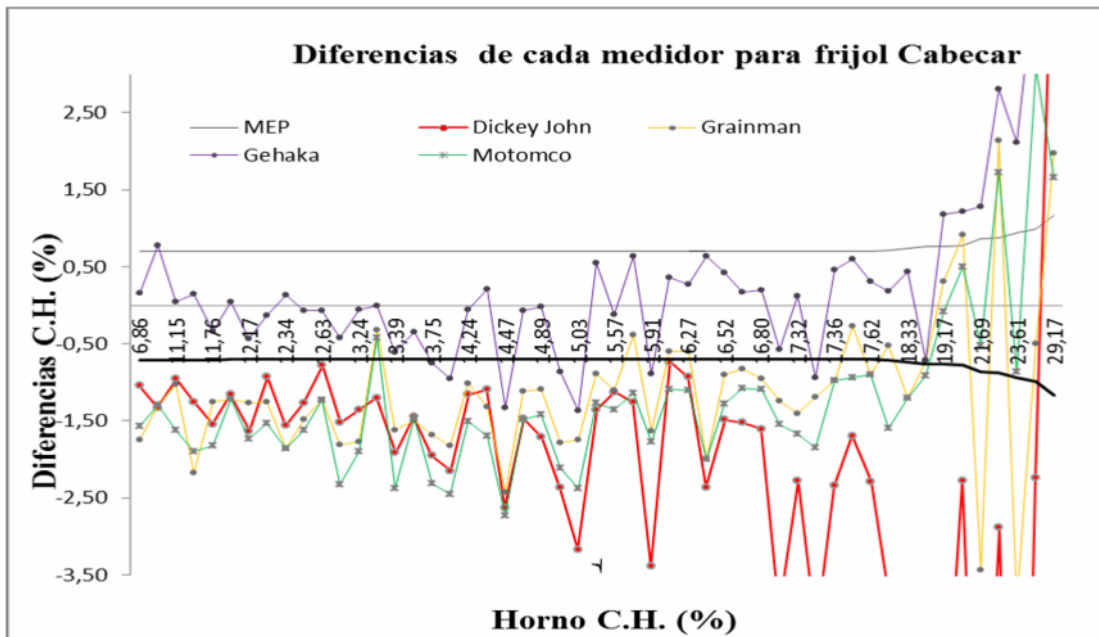


Gráfico 20. Diferencias de contenido de humedad entre horno y Dickey John Gac2100 para frijol rojo Cabécar.

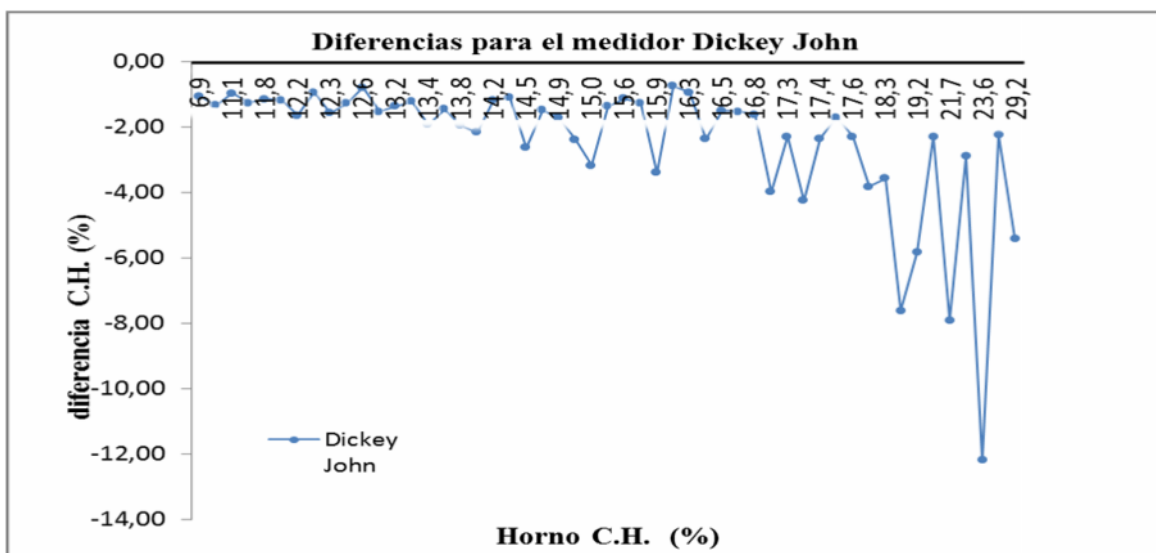


Gráfico 21. Diferencias de contenido de humedad entre horno y el Grainman para frijol rojo Cabécar.

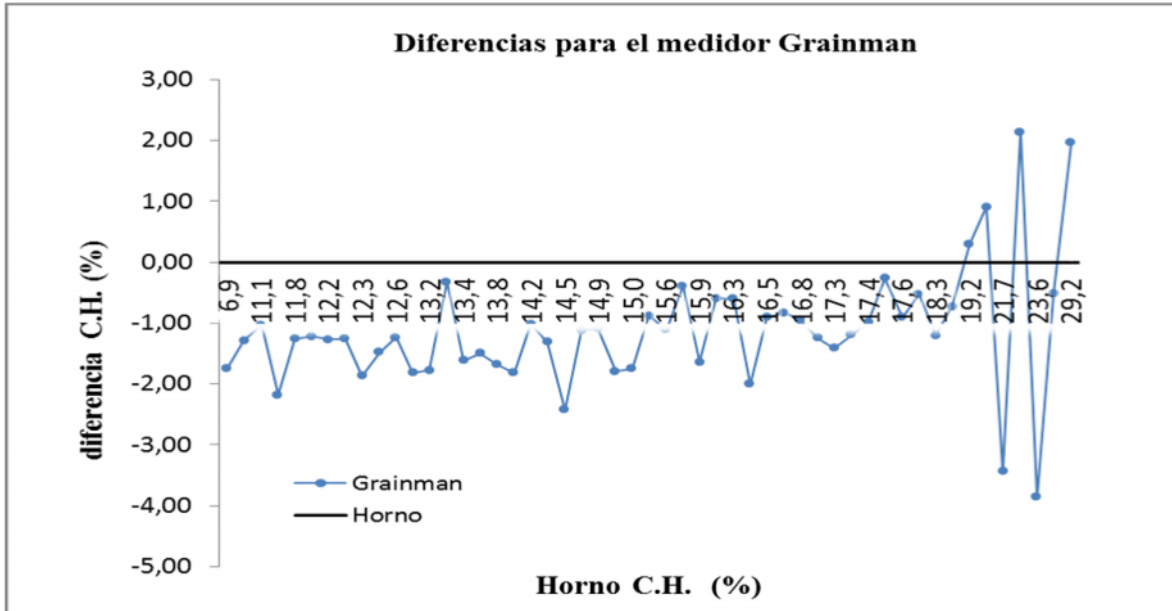


Gráfico 22. Diferencias de contenido de humedad entre horno y el Gehaka 919 para frijol rojo Cabécar.

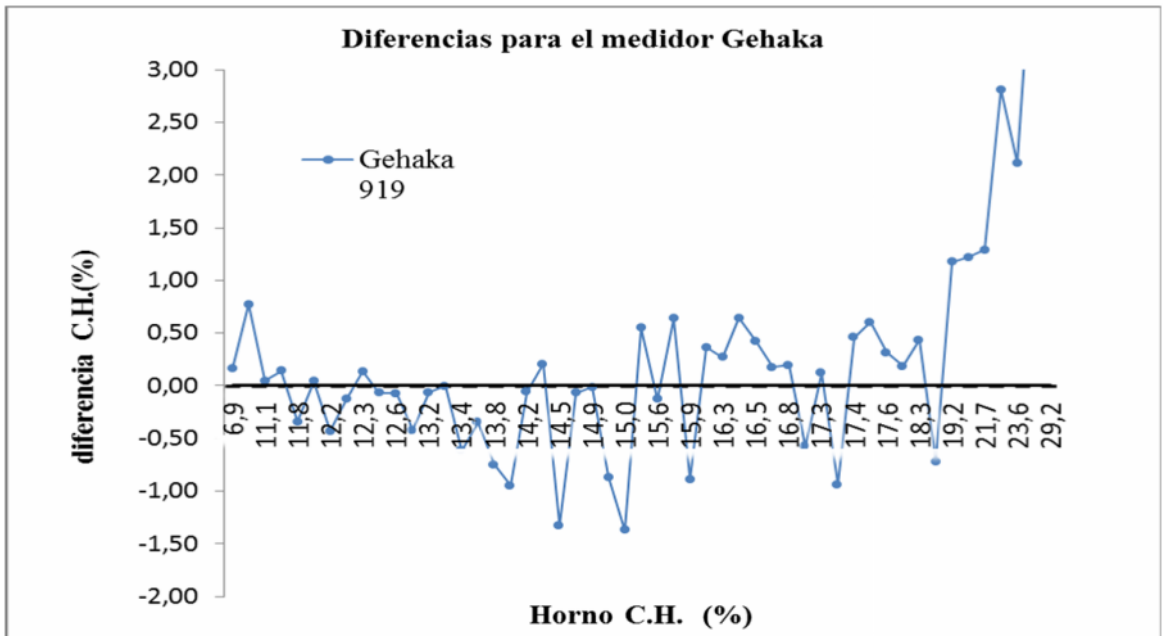
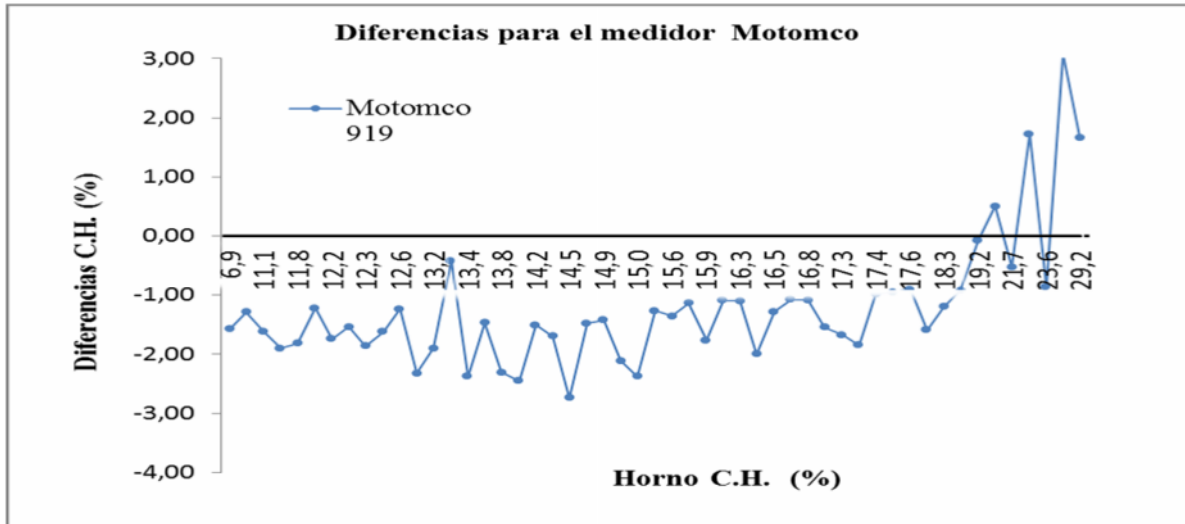


Gráfico 23. Diferencias de contenido de humedad entre horno y el Motomco 919 para frijol rojo Cabécar



8.2.2 Gráficos de contenido de humedad para frijol negro Guaymí.

Gráfico 24. Diferencias del contenido de humedad (%) de los medidores en función de las tolerancias a lo largo de cada contenido de humedad obtenido

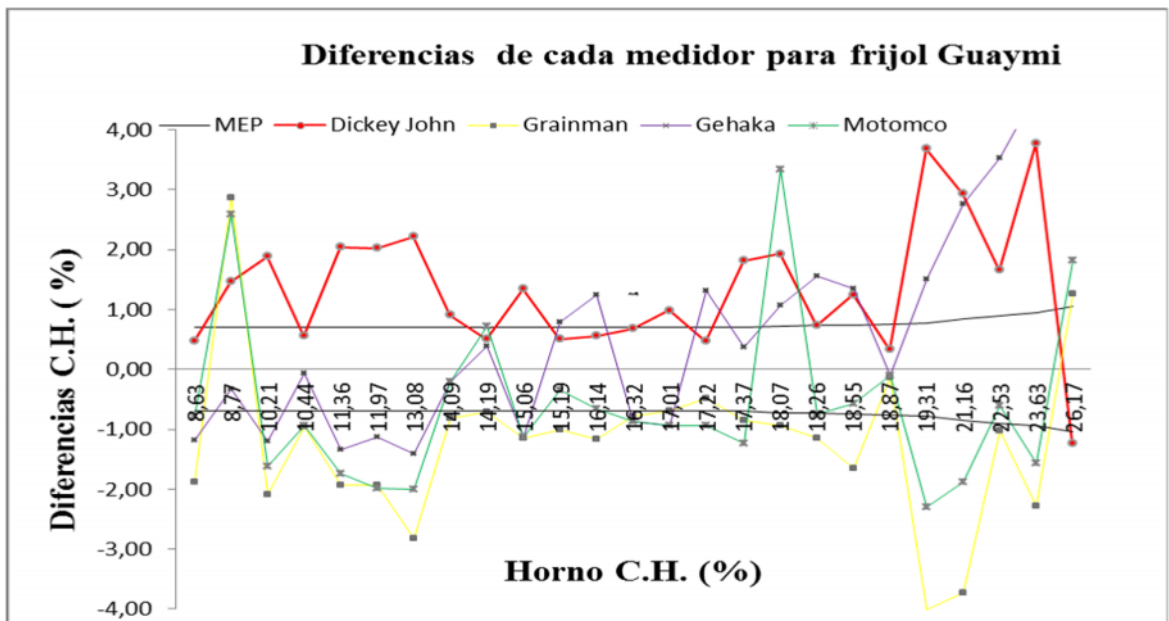


Gráfico 25. Diferencias de contenido de humedad entre horno y el Dickey John Gac2100 para frijol negro Guaymí

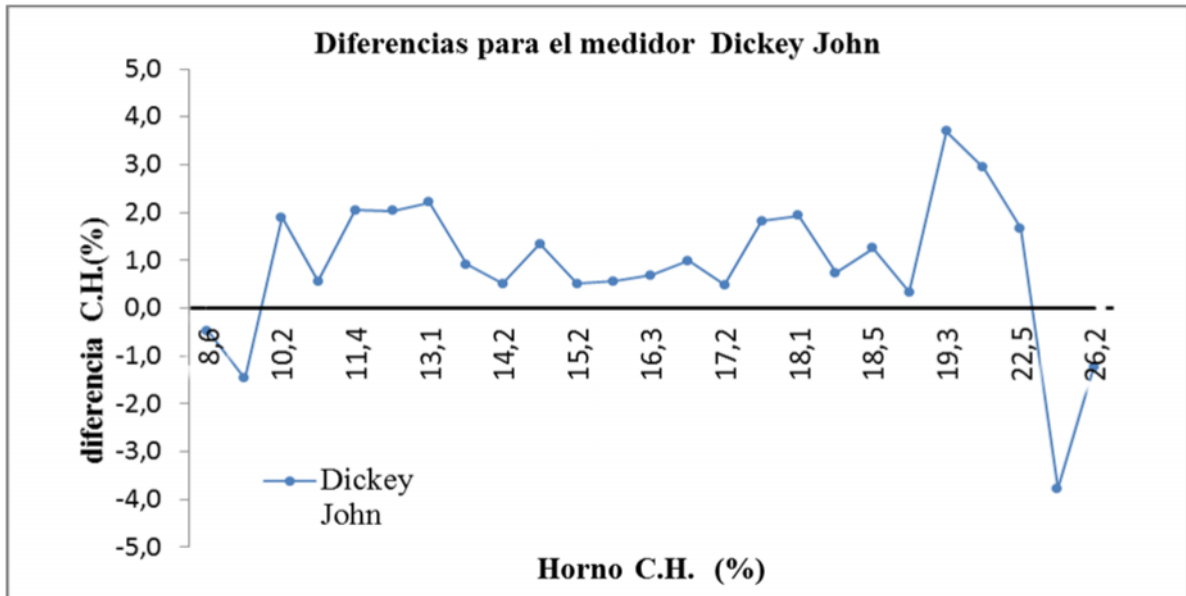


Gráfico 26. Diferencias de contenido de humedad entre horno y el Grainman para frijol negro Guaymí

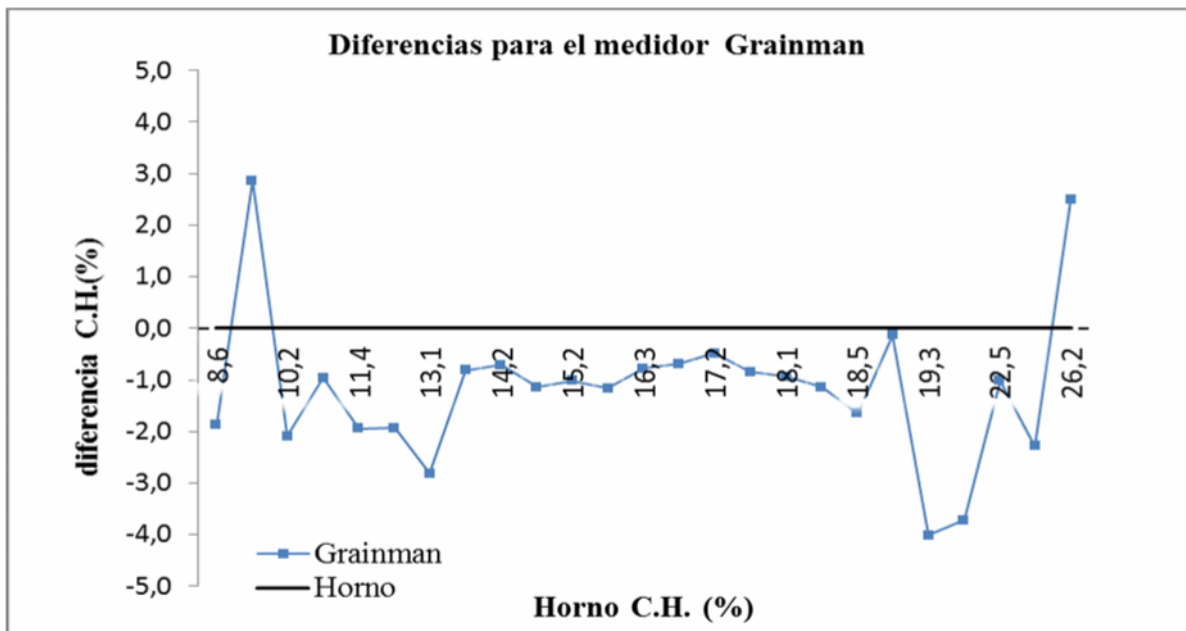


Gráfico 27. Diferencias de contenido de humedad entre horno y el Gehaka para frijol negro Guaymí

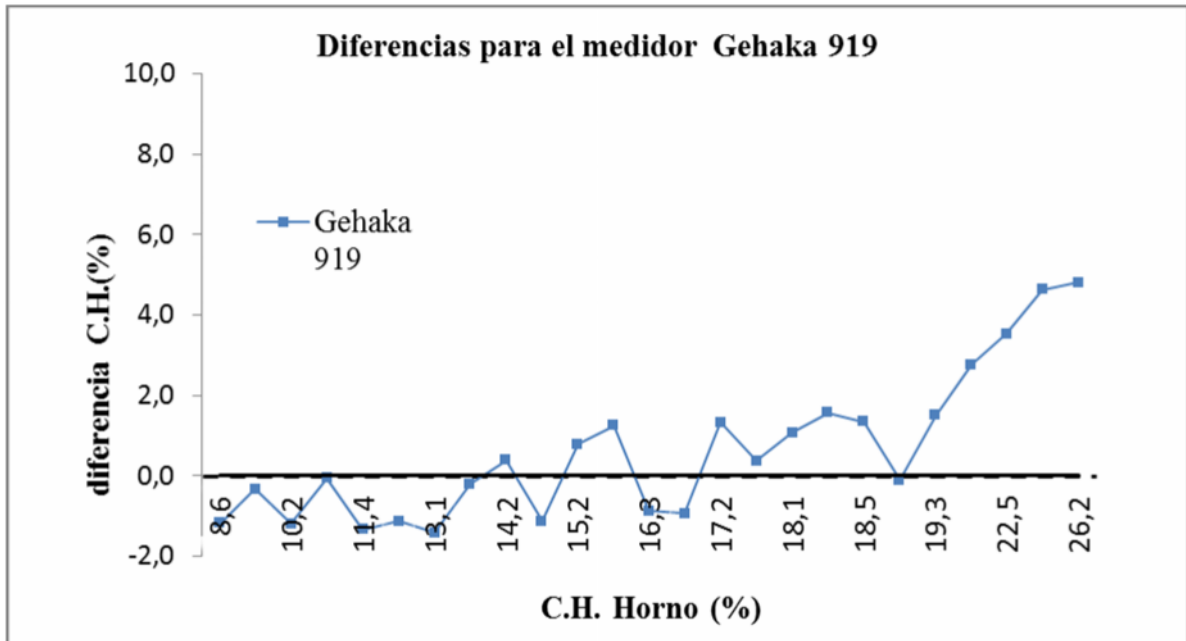
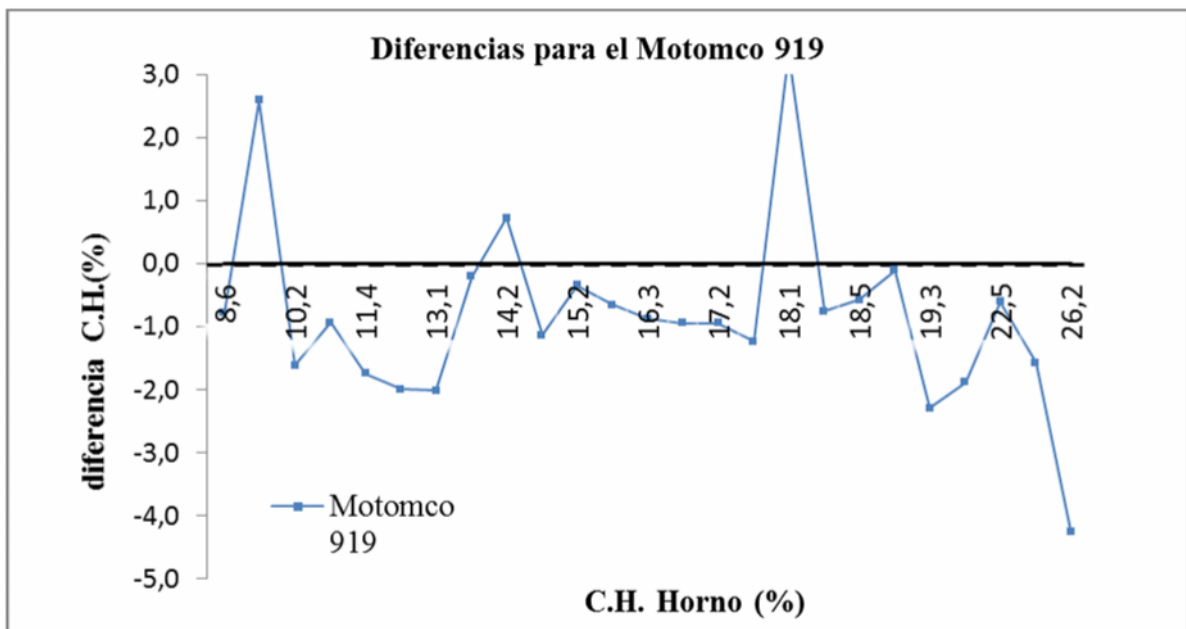


Gráfico 28. Diferencias de contenido de humedad entre horno y el Motomco 919 para frijol negro Guaymí.



8.3 ANEXO C

Metodología para cada medidor de contenido de humedad.

8.3.1 Medidor Dickey-John GAC® 2100



Figura 8. Medidor Dickey John Gac 2100.

Fuente: Elaboración propia.

Procedimiento:

1. Seleccione el grano a medir a través del teclado.
2. Vierta una muestra de grano en la tolva (hasta su parte superior) e introduzca un número de identificación ID de muestra (opcional).
3. Oprima la tecla de Carga. La muestra de grano es cargada (vertida) en la celda de muestra y un brazo nivela y remueve el exceso.
4. Espere aproximadamente 15 segundos para que los resultados de la muestra sean procesados. La lectura de contenido de humedad y la temperatura del grano son desplegadas.
5. Oprima la tecla DESCARGA para vaciar el contenido de la celda de medición. La celda de prueba gira 180° (invertidamente) para descargar el grano en una bandeja colectora de muestra. Después que la celda regresa a su posición hacia arriba, la unidad está lista para la siguiente medición.
6. Repita los pasos 1 a 5 dos veces más. Es decir, tomar tres lecturas del medidor.
7. Promediar las 3 lecturas.

8.3.2 Medidor Gehaka G919-Agri



Figura 9 Medidor Gehaka G919-Agri.

Fuente: Elaboración propia.

Procedimiento:

1. Seleccione el grano a medir a través del teclado.
2. Presione la tecla amarilla, espere que el equipo empiece a medir el peso del grano para verterlo.
3. Agregue muestra hasta que en la pantalla aparezca 100 % de la masa requerida.
4. Una vez alcanzado el 100 %, el equipo le avisara con pequeño sonido, que está listo, luego del cual el descargara automáticamente en la celda de medición el grano.
5. Espere aproximadamente 15 segundos para que los resultados de la muestra sean procesados. La lectura de contenido de humedad y la temperatura del grano son desplegadas.
6. Una vez hecha la lectura, el equipo descarga la muestra automáticamente en una bandeja colectora.
7. Repita los pasos 2 a 6 dos veces más. Es decir, tomar tres lecturas del medidor.
8. Promediar las 3 lecturas.

8.3.3. Medidor Motomco 919



Figura 10 Medidor Motomco 919.

Fuente: Elaboración propia.

Procedimiento:

1. Pesar una muestra homogenizada de 250 g.
2. Coloque el cilindro de carga en la celda de medición.
3. Gire la perilla en función calibrar
4. Gire el mando grande en el lado derecho del medidor hasta que la aguja alcanza la posición más baja a la izquierda de la escala del medidor.
5. Agregue la muestra
6. Presione el botón de liberación de la muestra en el compartimiento de medición.
Importante: Si los contactos de la superficie del cilindro no están bien colocados, la lectura del medidor será inexacta.
7. Registre la lectura en la carátula que posee una división de escala de 0.5, el valor correspondiente a la superposición de la línea de la carátula y la marca roja del equipo. Tomar la lectura (Hacer conversión con tablas del fabricante para el tipo de grano, previo conocimiento de la temperatura del grano).
8. Repita los pasos 2 a 6 dos veces más. Es decir, tomar tres lecturas del medidor.
9. Promediar las 3 lecturas.

8.3.4. Medidor Grainman (919 Canadiense).



Figura 11 Medidor Grainman (919 Canadiense).

Fuente: Elaboración propia.

Procedimiento:

1. Pesar una muestra homogenizada de 250 g.
2. Coloque el cilindro de carga en la celda de medición.
3. Gire la perilla en función calibrar
4. Gire el mando grande en el lado derecho del medidor hasta que la aguja alcanza la posición más baja a la izquierda de la escala del medidor.
5. Agregue la muestra
6. Inserte el termómetro dentro de la muestra y espere unos segundos para estabilizar la medición y tome la lectura.
7. Presione el botón de liberación de la muestra en el compartimiento de medición. Importante: Si los contactos de la superficie del cilindro no están bien colocados, la lectura del medidor será inexacta.
8. Registre la lectura en la carátula que posee una división de escala de 0.5, el valor correspondiente a la superposición de la línea de la carátula y la marca roja del equipo. Tomar la lectura (Hacer conversión con tablas del fabricante para el tipo de grano).
9. Repita los pasos 2 a 6 dos veces más. Es decir, tomar tres lecturas del medidor.
10. Promediar las 3 lecturas.

8.4 ANEXO D

Análisis de datos atípicos en los resultados con las normas.

8.4.1 Selección de datos anómalos

Del conjunto de contenidos de humedad medidos con los equipos indirectos y en el método del horno (tabla 26), se procedió a analizar por filas (para mismo punto de C.H), con la prueba Q de Dixon para detectar datos anormales que puedan interferir en los análisis de precisión y reproducibilidad utilizados en las normas, para el caso de repetibilidad en todos los equipos según los parámetros de lo recomendado cumplieran las tolerancias sugeridas por las normas.

La prueba Q de Dixon es utilizada estadísticamente para examinar si una o varias mediciones de un pequeño conjunto de réplicas de las observaciones es normal o se comporta de manera anómala, razón por la cual se puede del conjunto de observaciones.

La prueba Q utiliza la fórmula (9).

$$Q_{\text{exp}} = \frac{\text{Diferencia entre el dato sospechosos y su vecino más cercano}}{\text{Diferencia numérica entre el dato de mayor valor y el de menor valor}} \quad (9)$$

De manera que si el $Q_{\text{calculada}}$ es menor a un $Q_{\text{teórico}}$ (ver tabla 25), los cuales representan los valores críticos de Q para 3 niveles de confianza (90%, 95%, 99%), por lo cual el valor sospechoso como anormal se conserva, caso contrario si el $Q_{\text{calculada}}$ es mayor al $Q_{\text{teórico}}$ se desecha dicho valor.

Tabla 25. Valores críticos de Q teóricos según nivel de confianza.

N	Q crítico (Nivel de confianza 90%)	Q crítico (Nivel de confianza 95%)	Q crítico (Nivel de confianza 99%)
3	0,941	0,970	0,994
4	0,765	0,829	0,926
5	0,642	0,710	0,821
6	0,560	0,625	0,740
7	0,507	0,568	0,680
8	0,468	0,526	0,634
9	0,437	0,493	0,598
10	0,412	0,466	0,568

Fuente: EDUCATIONAL APPLETS.

8.4.2 Resultados para frijol rojo variedad Cabécar.

En el caso del frijol rojo como se puede apreciar en la tabla 27, hay 6 filas de datos que según la prueba Q de Dixon son anómalos (para un 90 % de confianza), 2 de los cuales están entre 10% y 18 % C.H, y corresponden según la prueba del horno de 16,83 % y 13,3 %.

De manera que al calcular su Q experimental, dieron como resultado 0,715 y 0,650, los cuales son mayores al Q teórico según la tabla 26 es 0,642 %, razón por lo cual se eliminan de la lista.

Tabla 26. Datos de contenido de humedad para frijol rojo Cabécar en el horno de convección y en cada equipo. (Con los posibles datos anómalos marcados).

Horno C.H. (%)	Dickey John C.H. (%)	Grainman Canadiense C.H. (%)	Gehaka 919 C.H. (%)	Motomco 919 C.H. (%)	Q exp.	Horno C.H. (%)	Dickey John C.H. (%)	Grainman Canadiense C.H. (%)	Gehaka 919 C.H. (%)	Motomco 919 C.H. (%)	Q exp.
29,17	34,6	27,2	22,2	27,51	0,438	15,03	18,2	16,78	16,4	17,41	0,249
24,86	27,1	25,36	20,5	21,78	0,264	14,93	17,3	16,72	15,8	17,04	0,110
23,61	35,8	27,47	21,5	24,48	0,583	14,89	16,6	15,98	14,9	16,31	0,170
21,91	24,8	19,77	19,1	20,19	0,882	14,63	16,1	15,75	14,7	16,11	0,007
21,69	29,6	25,12	20,4	22,21	0,487	14,47	17,1	16,9	15,8	17,21	0,078
19,52	21,8	18,61	18,3	19,02	0,651	14,31	15,4	15,62	14,1	16	0,316
19,17	25	18,87	18	19,25	0,821	14,24	15,4	15,25	14,3	15,75	0,241
19,08	26,7	19,81	19,8	20	0,971	14,05	16,2	15,87	15	16,5	0,200
18,33	21,9	19,53	17,9	19,53	0,592	13,75	15,7	15,43	14,5	16,06	0,156
17,69	21,5	18,21	17,5	19,28	0,555	13,45	14,9	14,95	13,8	14,92	0,020
17,62	19,9	18,52	17,3	18,52	0,531	13,39	15,3	15	14	15,76	0,194
17,61	19,3	17,87	17	18,55	0,326	13,3	14,5	13,62	13,3	13,72	0,650
17,36	19,7	18,34	16,9	18,34	0,486	13,24	14,6	15,01	13,3	15,14	0,068
17,32	19,6	18,73	17,2	18,99	0,254	12,88	14,4	14,69	13,3	15,2	0,220
16,83	20,8	18,07	17,4	18,37	0,715	12,63	13,4	13,86	12,7	13,86	0,000
16,8	18,4	17,75	16,6	17,88	0,289	12,43	13,7	13,91	12,5	14,05	0,086
16,58	18,1	17,4	16,4	17,65	0,412	12,34	13,9	14,2	12,2	14,2	0,000
16,52	18	17,42	16,1	17,8	0,305	12,27	13,2	13,53	12,4	13,81	0,182
16,34	18,7	18,34	15,7	18,34	0,120	12,17	13,8	13,44	12,6	13,91	0,063
16,27	17,2	16,87	16	17,37	0,124	11,84	13	13,06	11,8	13,06	0,00
16,16	16,9	16,76	15,8	17,26	0,247	11,76	13,3	13,02	12,1	13,58	0,154
15,91	19,3	17,55	16,8	17,68	0,478	11,54	12,8	13,72	11,4	13,44	0,337
15,74	17	16,13	15,1	16,88	0,095	11,15	12,1	12,18	11,1	12,77	0,414
15,57	16,7	16,68	15,7	16,93	0,187	9,67	11	10,96	8,9	10,96	0,019
15,55	16,9	16,43	15	16,81	0,047	6,86	7,9	8,6	6,7	8,43	0,089

De modo que para el cálculo de la precisión \bar{Y} y SDD, utilizando las formulas (5) y (6) respectivamente, para los datos de contenido de humedad de los medidores y el horno (comprendido entre 10 % y 18 % C.H.), se tiene la tabla 27.

Tabla 27. Precisión \bar{Y} y SDD obtenidos en cada equipo en frijol rojo. (Descartando los posibles datos anómalos marcados).

	Dickey-John Gac2100	Grainman	Gehaka 919	Motomco 919
\bar{Y}	1,96	1,22	0,44	1,52
SDD	0,91	0,50	0,35	0,50
(Sin datos anómalos)				
	Dickey-John Gac2100	Grainman	Gehaka 919	Motomco 919
\bar{Y}	1,77	1,18	0,40	1,47
SDD	0,77	0,55	0,34	0,57

Para el cálculo de la reproducibilidad SDD_1 entre los medidores, según la fórmula 8, se obtiene como resultado la tabla 28.

Tabla 28 Reproducibilidad SDD_1 obtenidos entre equipos indirectos en frijol rojo. (Descartando los posibles datos anómalos marcados).

	Dickey- John y Grainman	Dickey- John y Gehaka	Dickey-John y Motomco	Grainman y Gehaka	Grainman y Motomco	Gehaka y Motomco
SDD1	0,81	0,83	0,36	0,46	0,26	0,38
(sin datos anómalos)						
	Dickey- John y Grainman	Dickey- John y Gehaka	Dickey-John y Motomco	Grainman y Gehaka	Grainman y Motomco	Gehaka y Motomco
SDD1	0,75	0,79	0,32	0,44	0,26	0,33

8.4.3 Resultados para frijol negro variedad Guaymí.

En frijol negro como se puede apreciar en la tabla 29 hay 3 filas de datos que según la prueba Q de Dixon son anómalos (para un 90 % de confianza), entre 10% y 18 % C.H., que corresponden según la prueba horno a 18,87 %, 17,37 % y 16,14 respectivamente.

Al calcular su Q experimental, da como resultado 0, 870; 1,661 y 2,908 los cuales son mayores al Q teórico según la tabla 25 es 0,642, de manera que se eliminan como datos anómalos.

Tabla 29. Datos de contenido de humedad para frijol negro Guaymí en el horno de convección y en cada equipo. Con los posibles datos anómalos marcados

Horno C.H. (%)	Dickey John C.H. (%)	Grainman Canadiense C.H. (%)	Gehaka 919 C.H. (%)	Motomco 919 C.H. (%)	Q exp.
26,17	27,4	24,9	20,1	24,35	0,168
23,63	27,4	25,91	19	25,2	0,449
22,53	24,2	23,55	19	23,13	0,125
21,16	24,1	24,88	18,4	23,04	0,120
19,31	23	23,32	17,8	21,6	0,058
18,87	19,2	19	18,97	18,97	0,870
18,55	19,8	20,2	17,2	19,12	0,133
18,26	19	19,4	16,7	19,01	0,148
18,07	20	19	17	14,72	0,189
17,37	19,2	18,22	17	18,61	1,661
17,22	17,7	17,7	15,9	18,16	0,204
17,01	18	17,7	17,95	17,95	0,051
16,32	17	17,1	17,19	17,19	0,000
16,14	16,7	17,3	14,9	16,79	2,908
15,19	15,7	16,2	14,4	15,53	0,333
15,06	16,4	16,2	16,19	16,19	0,157

15,06	16,4	16,2	16,19	16,19	0,157
14,19	14,7	14,9	13,8	13,46	0,139
14,09	15	14,9	14,29	14,29	0,110
13,08	15,3	15,9	14,5	15,09	0,213
11,97	14	13,9	13,1	13,96	0,020
11,36	13,4	13,3	12,7	13,1	0,049
10,44	11	11,4	10,5	11,38	0,021
10,21	12,1	12,3	11,4	11,82	0,096
8,77	7,3	5,9	9,1	6,17	0,103
8,63	9,1	10,5	9,8	9,41	0,374

Para el cálculo de la precisión \bar{Y} y SDD, utilizando las formulas (5) y (6) respectivamente, para los datos de contenido de humedad de los medidores y el horno (comprendido entre 10 % y 18 % C.H.) se tiene como resultado la tabla 30 para cada medidor con respecto al horno.

Tabla 30. Resumen de \bar{Y} y SDD obtenidos para la precisión de cada equipo para frijol negro. (Descartando los posibles datos anómalos marcados).

	Dickey-John Gac2100	Grainman	Gehaka 919	Motomco 919
\bar{Y}	1,16	1,18	0,91	1,12
SDD	0,66	0,66	0,48	0,79
(Sin datos anómalos.)				
	Dickey-John Gac2100	Grainman	Gehaka 919	Motomco 919
\bar{Y}	0,92	1,03	0,75	0,88
SDD	0,70	0,68	0,51	0,85

Para el cálculo de la reproducibilidad SDD_1 entre los medidores, según la fórmula 8, se obtiene la tabla 31.

Tabla 31 .Resumen de SD_1 obtenidos para la reproducibilidad entre equipos indirectos para frijol negro. (Descartando los posibles datos anómalos marcados).

	Dickey- John y Grainman	Dickey- John y Gehaka	Dickey- John y Motomco	Grainman y Gehaka	Grainman y Motomco	Gehaka y Motomco
SDD1	0,29	0,81	0,91	0,97	0,98	1,00
(sin datos anómalos)						
	Dickey-John y Grainman	Dickey-John y Gehaka	Dickey- John y Motomco	Grainman y Gehaka	Grainman y Motomco	Gehaka y Motomco
SDD1	0,29	0,91	0,81	0,97	0,98	0,99

8.4.4 Consideraciones finales

- Comparando los resultados para precisión en frijol rojo de la variedad Cabécar con los datos anómalos y sin los mismos según tabla 27 respectivamente, el medidor Gehaka sigue siendo el único equipo que cumple el parámetro de las normas.
- Para el caso de reproducibilidad comparando los resultados para el frijol rojo de la variedad Cabécar con los datos anómalos y sin los mismos según tabla 28 respectivamente, los medidores no son comparables entre sí según el parámetro de las normas.
- Comparando los resultados para precisión en frijol negro de la variedad Guaymí con los datos anómalos y sin los mismos según tabla 30 respectivamente, hay un aumento en la diferencias con respecto al horno, de manera que no se cumple con el parámetro de las normas.
- Para el caso de reproducibilidad comparando los resultados para el frijol negro de la variedad Guaymí con los datos atípicos y sin los mismos según tabla 31 respectivamente, los medidores no son comparables entre sí según el parámetro de las normas.