

PROYECTO 1113-05-137-10 COLCIENCIAS/UNIVERSIDAD DEL QUINDÍO

**INFORME TÉCNICO FINAL
DEL
PROYECTO
COLCIENCIAS-UNIQUINDIO**

Código: 113-05-13710

**Título:
ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MAGNETO-ÓPTICAS DE PELÍCULAS
DELGADAS DE $Mn_{0.6}Zn_{0.4}Fe_2O_4/Fe$**

Fecha: Septiembre de 2006

CONTENIDO

FICHA TECNICA.....	3
1. Título	4
2 Número del Contrato:	4
3.Entidad ejecutora:	4
4.Sinopsis Divulgativa.....	4
5. Sinopsis técnica	5
5.1 Abstract.....	5
5.2 Resumen	5
6. Resumen técnico.....	7
6.1 Fabricación.	7
6.2 Implementacion del sistema	7
7. CUADRO No 1	12
8. CUADRO No 2	14
9. ANEXOS	19
10. Informe Financiero.....	34

FICHA TECNICA

- | | | |
|---|---|----------------|
| 1. Título: | Estudio de propiedades magneto-ópticas de películas delgadas de Mn _{0.6} Zn _{0.4} Fe ₂ O ₄ /Fe. | |
| 2. Código: | 113-05-13710 | |
| Número del Contrato: | 230-2003 | |
| 3. Entidad ejecutora: | Universidad del Quindío | |
| Investigador Principal: | Aminta Mendoza | |
| Grupo de Investigación: | Optoelectrónica | |
| 4. Participantes en el Proyecto: | Aminta Mendoza | Inv. Principal |
| | Octavio Guzmán | Coinvestigador |
| | Diego Arias | Coinvestigador |
| | Wilson Lopera | Coinvestigador |
| | Edgar Salazar | Coinvestigador |
| | Hernando Ariza | Coinvestigador |
| | Carlos Calle | Est. Maestría |
| | Hugo Calle | Est. Maestría |
| | Fabián Cuellar | Est. Maestría |
| | Oscar Marín | Est. Pregrado |
| | Daniel Salazar | Est. Pregrado |
| | Ellen Elizabeth Vega | Est. Pregrado |
| | Edgar Andrés Marín | Est. Pregrado |

Fecha: Septiembre de 2006

1. Título

Estudio de propiedades magneto-ópticas de películas delgadas de $Mn_{0.6}Zn_{0.4}Fe_2O_4/Fe$. Código : 113-05-13710

2 Número del Contrato: 230-2003

3. Entidad ejecutora: Universidad del Quindío

4. Sinopsis Divulgativa

Generalidades: Cada día son más los nuevos materiales que rodean el diario vivir. Prácticamente en cada actividad, sin que el común de las personas lo sepan tienen acceso a alta tecnología que ha sido el producto de una gran inversión en investigación, tanto humana como financiera. Algunos de estos resultados son los celulares, computadores, acceso a canales de televisión a lo largo del mundo, la aeronáutica, los hornos, cerámicos, automóviles, etc. En cada uno de los casos mencionados, juegan un papel importante, sino el más importante, los materiales empleados, su fabricación y el conocimiento sobre sus propiedades. La ciencia básica inicia este proceso de desarrollo desde un modesto papel como es el desarrollo de dichos materiales, llamados en la actualidad *Novel Materials*. En desarrollo de este proyecto, hemos concentrado nuestro esfuerzo en materiales denominados ferritas (por su contenido de hierro, ordenado a nivel atómico en una red de oxígenos, que lleva el mismo nombre) cuya propiedad más marcada es su respuesta a la presencia de campos magnéticos, tal como los producidos por imanes comunes, o por sistemas más sofisticados y controlados (como bobinas normales o superconductoras). Una de las principales características de este material, es que con pequeños cambios en el campo magnético, el material pasa de tener un ordenamiento magnético paralelo al campo, a otro totalmente opuesto, y esto los hace de gran utilidad en el campo de las memorias magnéticas y discos duros.

Objetivo: La fabricación de este material en estructura de película (materiales con espesores que oscilan entre millonésimas y milésimas de centímetro y con superficies del orden de los cm^2), presenta además unas propiedades particulares -cuyo estudio era de nuestro interés- la ventaja de ser fácilmente introducido en el desarrollo de nuevos dispositivos, gracias a sus dimensiones. Nuestro objetivo era estudiar estas películas de ferritas utilizando una técnica novedosa en Colombia, denominada técnica por efecto Kerr magneto-óptico (MOKE). Esta técnica consiste básicamente en observar cómo cambian las propiedades de un haz láser que se refleja sobre la película magnetizada -Con magnetización nos referimos al comportamiento de "imán" que adquiere la película en presencia de un campo magnético. Como este cambio sobre el haz está directamente relacionado con la manera en que el material se magnetiza por el campo externo, nos permite de manera óptica, conocer la respuesta magnética del material. La evaluación y comprensión de la respuesta del material nos permitirá conocer y controlar los materiales, para inferir futuros desarrollos tecnológicos.

Resultados: En desarrollo de esta investigación fabricamos las películas, implementamos la técnica MOKE y evaluamos el comportamiento magnético de las películas. Como principal resultado identificamos estructuras en la superficie de la película, que se originan en el proceso de fabricación, y que son responsables por su respuesta magnética. Adicionalmente desarrollamos un software que nos permitirá, mediante la aplicación de esta técnica, evaluar los espesores de las capas y de multicapas con facilidad, para el control de procesos de fabricación y obtención de películas con propiedades muy específicas según sea su aplicación.

5. Sinopsis técnica

5.1 Abstract

Mn Zn and NiZn ferrites films deposited by RF sputtering technique on (100)- MgO and Si substrates have been studied by the magneto-optical Kerr effect. The film thicknesses, ranging between 30 and 450 nm were determined by Scanning electron microscopy SEM In order to this research, was implemented a MOKE system with polar, longitudinal and transversal geometries. The system was calibrated with CoPd samples previously evaluated.

The coercivity behavior as a function of the thickness indicates a spin reversal mainly governed by the single domain regime. The Jiles-Atherton Model was used to fit the experimental hysteresis loop. The k pinning parameter of the model increases by increasing film thicknesses. The multidomain structure in MnZn ferrite films and its effect on the pinning energy of domain walls are investigated using Atomic-force microscopy AFM, Magneto-optical Kerr effect MOKE and Vibrating Sample Magnetometer VSM. MnZn. The AFM images show an increment in grain size as the film thickness increases. Grains with diameter between $\phi \sim 70$ and 700 nm have been observed. The coercive field H_c as a function of the grain size reaches a maximum value of 80 Oe for $\phi_c \sim 300$ nm. This result indicates the existence of a multidomain structure associated with a critical grain size. That is when the size of the grain attains a value at which it becomes multidomain. We used the Jiles-Atherton model[1,2] to discuss the experimental hysteresis loops. The Jiles-Atherton model is based on domain wall motion, of an irreversible component due to wall displacement and a reversible component due to domain wall bending. The k pinning parameter of the model, $k = dE_{lost}/dM$ shows a maximum value of $k/\mu_0 = 45$ for grains with $\phi_c \sim 300$ nm. Thus, above this ϕ_c , the pinning has a minor effect on the wall displacement.

5.2 Resumen

Se han estudiado por medio del efecto Kerr magneto-óptico películas ferritas de MnZn y NiZn depositadas por medio de la técnica de pulverización catódica RF sobre sustratos de Si y MgO (100) Los espesores de las muestras, entre 30 y 450 nm fueron determinados por medio de microscopía electrónica de barrido.. Para ello se implementó un sistema Magneto óptico basado en el efecto Kerr (MOKE), el cual puede ser utilizado bajo geometrías longitudinal, trasversal o polar. Este sistema fue calibrado a través de una muestra de CoPd evaluada previamente en un laboratorio certificado.

Se observó un comportamiento del campo coercitivo como función del espesor, correspondiente a muestras magnéticamente blandas. En ferritas de MnZn, una reducción en el campo coercitivo fue interpretada como una inversión de espin bajo un régimen de monodominio. Se utilizó el modelo de Jiles-Atherton para ajustar los ciclos de histéresis experimentales, lo cual permitió obtener cuantitativamente el parámetro de anclaje k . Este parámetro se incrementó con los espesores de las películas, señalando claramente la aparición de multidominios.

La estructura multidominio en las ferritas MnZn y su efecto en la energía de anclaje de las paredes de dominio fueron estudiadas por medio de microscopía de fuerza atómica AFM, efecto Kerr magneto-óptico MOKE y magnetómetro de muestra vibrante VSM. Las imágenes de AFM mostraron un incremento en el tamaño de grano a medida que el espesor de la película se incrementa. La morfología superficial de las películas era granular, con granos de diámetros entre $\varphi \sim 70$ y 700 nm. Se observó un campo coercitivo que se incrementaba con el tamaño de grano, hasta alcanzar un valor máximo de 80 Oe para $\varphi_c \sim 300$ nm. Este resultado apoya la hipótesis de la existencia de una estructura multidominio asociada con un tamaño del grano crítico. Todas las medidas MOKE fueron simuladas a través del modelo de Jiles-Atherton. El modelo de Jiles-Atherton está basado en el movimiento de las paredes de dominio, el cual introduce una componente irreversible debida al desplazamiento de la pared y una componente reversible debida a la deformación de la pared. El parámetro de anclaje k del modelo, $k=dE_{\text{los}}/dM$ mostró un valor máximo de $k/\mu_0 = 45$ para granos con $\varphi_c \sim 300$ nm. Para valores superiores a 300 nm el anclaje decreció, sugiriendo un efecto menor – del anclaje - en el desplazamiento de las paredes.

6. Resumen técnico

6.1 Fabricación.

Se fabricaron y estudiaron películas ferritas fabricadas por la técnica de pulverización catódica RF, a presión de $7.05 \times 10^{-1} \pm 0.01$ mbar, temperatura de sustrato de $600 \pm 0.1^\circ\text{C}$, con tiempos de deposición variables y sustratos de MgO [001] y Si [001]. Los blancos de partida - $\text{Ni}_{0.75}\text{Zn}_{0.25}\text{Fe}_2\text{O}_4$ y $\text{Mn}_{0.25}\text{Zn}_{0.75}\text{Fe}_2\text{O}_4$ - fueron preparados mediante procesos cerámicos y evaluados mediante la técnica de difracción de rayos x (DRX). Realizando un refinamiento de parámetro de red [1-5] se identificaron dichas concentraciones. Las muestras crecidas sobre sustratos de Silicio fueron caracterizadas por microscopía electrónica (SEM). En este análisis se observaron superficies homogéneas y espesores bien definidos de las películas. De la observación de imágenes de SEM se estimaron los valores de espesor de las muestras indicando un incremento en dicho espesor con el tiempo de deposición. Con base en los espesores se hace un cálculo de tasa de deposición para el blanco empleado, bajo las condiciones de temperatura, presión y separación blanco-sustrato presentadas. Para este análisis se evaluaron los escalones creados por un enmascaramiento colocado durante el proceso de deposición. Los resultados de este análisis permitió obtener espesores que oscilaron entre $30 \pm 10\%$ nm y $450 \pm 10\%$ nm, para muestras con tiempos de deposición entre 7 y 90 minutos. Del análisis de composición (EDX) se observó que en todos los casos las muestras fueron homogéneas en su composición, y se conservó la estequiometría del blanco durante el proceso de deposición. La estructura de las muestras también fue evaluada utilizando la técnica de microscopía de fuerza atómica (AFM).. Las muestras presentaron una superficie brillante y homogénea, lo cual las permitió para el estudio de respuesta magnética por efecto Kerr, debido a su alta reflectividad. El análisis de AFM, permitió identificar estructuras granulares en la superficie, cuyo diámetro varía linealmente con el tiempo de deposición (ver figura 2), lo cual está en acuerdo con un crecimiento por difusión superficial en este tipo de técnicas [6]. La evaluación de las imágenes superficiales se realizó con el programa SPIP 3.0.011. Como se verá adelante, este crecimiento en el tamaño de islas define fuertemente las propiedades magnéticas de las películas, y permitió identificar el tamaño crítico al cual, las muestras pasan de un régimen de monodominio a multidominio.

6.2 IMPLEMENTACION DEL SISTEMA

En el desarrollo del proyecto, basado fundamentalmente en el estudio por técnicas magneto-ópticas de estos materiales, se implementó un sistema MOKE. Este sistema (ver figura 3a y 3b) cual puede operar tanto en configuración longitudinal – para muestras que magnetizan a lo largo de la superficie – como polar – para muestras que magnetizan perpendicularmente a la superficie [7]. Dicho equipo permite la realización de curvas de histéresis con campos hasta 1.2 ± 0.1 T, a temperaturas entre 20 y 400°C y ha sido representado en la figura 3c.. Un horno diseñado e implementado en desarrollo

de este proyecto, permite variar la temperatura sobre las muestras. El sistema fue inicialmente calibrado con multicapas de CoPd las cuales habían sido evaluadas en un Laboratorio certificado [8]. A partir de estas medidas se obtuvieron valores propios de estos materiales como la temperatura de bloqueo $T_b=1348\pm 43^\circ\text{C}$ y campo coercitivo $H_c=547\pm 20\text{Oe}$ [9] lo cual permitió identificar este tipo de materiales, por su bajo campo coercitivo y alta temperatura de bloqueo, como materiales ideales como componentes de memorias y dispositivos de almacenamiento de información.

6.3 ANALISIS DE PELICULAS FERRITAS

La evaluación por DRX permitió identificar la presencia de la fase ferrita, y mediante un refinamiento de parámetro de red se encontró que una concentración de Ni de $x\approx 0.75$ en $\text{Ni}_x\text{Zn}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$. Las imágenes de AFM mostraron una estructura superficial granular, cuyas dimensiones e implicaciones en la respuesta magnética del material serán develadas más adelante.

Adicionalmente las muestras fueron evaluadas a través de la técnica MOKE, implementada a través de este proyecto, que permitió obtener las curvas de histéresis magnética de las películas. Las primeras medidas MOKE fueron realizadas realizando un barrido superficial, el cual no arrojó variaciones a lo largo de la superficie. Esto mostró una homogeneidad en la superficie en un área de 1mm^2 (área del *spot* del láser) *. A través del análisis de curvas de histéresis de películas ferritas de NiZn se observó que los valores de campo coercitivo fueron inferiores a 100 Oe, lo cual está en buen acuerdo con lo esperado para materiales magnéticamente blandos[10]. La evaluación de estas últimas ofreció datos experimentales sobre el campo coercitivo de las películas (inferiores a los 1000 Oe) que las reiteran como materiales magnéticamente blandos, tal como se esperaba. Estas mismas curvas fueron evaluadas mediante una simulación basada en el modelo de Jiles-Atherton, el cual además nos permitió evaluar el parámetro de anclaje k (pinning parameter), el cual representa el efecto de las paredes de los dominios, y las pérdidas que ellos introducen en el material de la frontera de grano durante las transiciones de un estado de magnetización a otro. Los valores de k observados para muestras con diferentes espesores (entre 80 y 240) oscilaron entre $30\mu_0$ y $70\mu_0$ (con μ_0 la permitividad en el vacío). En el caso de estas películas (ver figura 4), fue posible identificar por primera vez –hasta donde nos es conocido– un comportamiento creciente en el valor del campo coercitivo con el espesor de las películas. Este resultado lleva a sugerir un incremento en las pérdidas de energía necesaria para invertir los momentos magnéticos, como función del tamaño de isla[11]:

$L(\text{nm}) \pm 5$	80	160	240
$k/\mu_0 \pm 0.2$	30	68	70

En donde L representa el espesor de la película y k el parámetro en mención [11, 12].

De esta manera se mostró que las curvas de histéresis de los ferromagnéticos blandos calculadas con el modelo de Jiles-Atherton, son altamente sensibles a las variaciones

en el parámetro de anclaje k . Adicionalmente se mostró la influencia de k sobre el campo coercitivo. De la comparación con el experimento se observó que la aproximación de campo promedio describe aceptablemente el ferromagnetismo blando en estructuras del tipo espinela, debido a su alto número de correlación. Se observó que la convergencia en la solución de Jiles-Atherton para $k < a$, ya que a es proporcional a la temperatura. Para temperaturas muy altas la relación k/a desaparece quedando como solución la función de Langevin para el caso paramagnético y que es conocido como comportamiento anhisterético.

En el análisis de películas ferritas de MnZn, se realizó un estudio estadístico del tamaño de isla como función del tiempo de deposición (espesor de la película). Para esto se realizó una aproximación de los granos a geometría esférica, es decir considerando una superficie de $4\pi r^2$, de tal manera que a partir de las medidas de AFM que permitían obtener el diámetro de los granos, se extrapoló un valor de superficie como función del espesor de las películas. Tanto en los sustratos de MgO como en los de Si, la relación fue lineal.

Las muestras fueron, igualmente al caso de NiZn, evaluadas a través del sistema MOKE, obteniendo curvas de histéresis que fueron igualmente evaluadas con el modelo de Jiles Atherton, para obtener valores de campo coercitivo y parámetro de anclaje k . Este parámetro corresponde a la energía perdida en la frontera del dominio, necesaria para generar un cambio en la magnetización de los espines de la frontera: $k = dE_{\text{lost}}/dM$. Por medio de simulación de las curvas de histéresis se mostró un comportamiento creciente de k con la frontera de grano, hasta alcanzar un valor máximo $k_{\text{max}} = 45\mu_0$ para la muestra con tamaño de grano del orden de $300 \pm 10\%$ nm (ver figura 5). Lo anterior parece demostrar que a este valor crítico de tamaño de grano, el anclaje comienza a tener un efecto menor a medida que el dominio crece. Para la región de monodominio se calculó en una aproximación lineal entre k y superficie de grano, la energía de anclaje por unidad de superficie en la frontera de grano como $E_p = 7.20 \times 10^{-5}$ y para la región de multidominio una energía de frontera de grano como $E_{\text{pig}} = -1.18 \times 10^{-5}$ indicando el que crecimiento del tamaño de los dominios que componen cada grano, reduce las pérdidas por anclaje por unidad de área (ver figura 5).

La región creciente del parámetro de anclaje con el tamaño del grano es consistente con [12, 13] el crecimiento de monodominios limitados por la frontera de grano. Un máximo en el mismo parámetro sugiere el límite en el tamaño monodominio, que sufre cambio al régimen de multidominio [14].

6.4 ANALISIS DE MULTICAPAS

Algunas de las películas de ferritas de MnZn, fueron recubiertas con una película de óxido de Hierro, para evaluar un posible efecto que esta capa tendría sobre la respuesta magnética de las primeras. La deposición se realizó por la técnica de evaporación, y los espesores utilizados oscilaron entre 5 y 30 μm . La respuesta magneto-óptica no exhibió cambios sustanciales, esto es, el comportamiento conservó

las características de materiales magnetos blandos, y una leve reducción del campo coercitivo del orden de un 10%.

La evaluación de espesores en las películas fue desarrollado teóricamente como herramienta fundamental para la evaluación de propiedades de fabricación de multicapas de diferentes materiales. Resultado de este análisis se realizaron simulaciones de la respuesta magneto-óptica de bicapas magnéticas de periodicidad 50, con espesor d variable, utilizando sustratos de Si y SrTiO₃ (Figura 6). En ella se emplearon parámetros macroscópicos propios de cada material, como el índice de refracción y constantes magneto-ópticas. El sustrato no generó un efecto sustancial en la respuesta magneto-óptica, dado que su espesor es del orden de 5 mayor. Para el caso de estas bicapas, el cambio en la intensidad de la respuesta Kerr permite identificar los valores críticos de espesor a partir de los cuales se da la transición Faraday-Kerr [15], esto es en donde se observa el cambio de un comportamiento aproximadamente lineal en su inicio, y la región de saturación de la señal para espesores $d > 400 \text{ \AA}$. Los valores de espesores críticos, encontrados para las muestras sobre los diferentes sustratos oscilaron entre 220 y 250 \AA .

En la Figura 7 se presentan los valores críticos calculados para variación del espesor de la bicapa, como función del número de bicapas, y se comparan para el caso de bicapas sin y con recubrimiento de Pd y/o Pt. Los espesores de los recubrimientos se mantuvieron fijos en 200 \AA , mientras en las bicapas de $(\text{MnZnFe}_2\text{O}_4/\text{Fe})_n$ y $(\text{NiZnFe}_2\text{O}_4/\text{Fe})_n$ se varió n de $1 < n < 45$. Este resultado es consistente con la descripción de un valor crítico directamente proporcional a la longitud de penetración. Como se observa, existe igualmente un número de bicapas crítico a partir del cual el espesor crítico se satura en el caso de periodicidad de 20 bicapas.

Adicionalmente se realizaron las simulaciones para el caso de variación en el espesor del recubrimiento (ver Fig. 8), identificando por primera vez un comportamiento claramente opuesto en el caso de las bicapas $(\text{MnZnFe}_2\text{O}_4/\text{Fe})_{30}$ con las bicapas de $(\text{NiZnFe}_2\text{O}_4/\text{Fe})_{30}$. En el primero un comportamiento creciente del espesor crítico a medida que el recubrimiento se incrementa (ya sea Pd o Pt) y en el segundo un decrecimiento del espesor crítico a medida que el recubrimiento se incrementa (ya sea Pd o Pt). Lo anterior parece sugerir que el recubrimiento favorece, en el caso del $\text{MnZnFe}_2\text{O}_4/\text{Fe}$, la trayectoria óptica dentro del material, mientras en el caso del $\text{NiZnFe}_2\text{O}_4/\text{Fe}$, el incremento en el espesor del recubrimiento la reduce.

Finalmente se realizaron las simulaciones de la longitud crítica de penetración para muestras de $(\text{MnZnFe}_2\text{O}_4)_n/(\text{Fe})_n$ y $(\text{NiZnFe}_2\text{O}_4)_n/(\text{Fe})_n$ con n (número de bicapas) variable. Las superficies obtenidas (ver figura 9), son la interfase entre una región de predominio del efecto Kerr (por encima de la superficie) y una región de predominio del efecto Faraday (por debajo de la superficie). En estas simulaciones se utilizó n variable entre 2 y 50. Como se observa en la figura hay un desplazamiento de la región crítica (región roja) hacia espesores de recubrimiento mayores. Esta superficie ofrece información muy importante que puede ser empleada en procesos de caracterización

de multicapas, y la identificación de condiciones de crecimiento indicadas para el diseño de dispositivos opto-magnéticos.

REFERENCIAS

- [1] M. Mouallem-Bahout, S. Bertrand, O. Peña, J. Solid State Chem., **178** (2005) pp. 1080-1086
- [2] A. H. Morrish, P. E. Clark, Phys. Rev. B **11**, 279 (1975)
- [3] U. König and G. Chol, J. Appl. Crystallogr. **1**, 124 (1968)
- [4] M. K. Fayek, J. Leciejewicz, A. Murasik and I. I. Yamzin, Phys. Status Solidi. **37**, 843 (1970)
- [5] L. K. Leung, B. J. Evans, and A. H. Morrish, Phys. Rev. B, **8**, 29 (1973)
- [6] A. Mendoza "Estudio de las propiedades morfológicas de películas epitaxiales de YBa₂Cu₃O_{7-x}" Tesis Doctoral - Física. Universidad Nacional, 2001
- [7] V. Calle, C. Calle, E. Salazar, P. Prieto, A. Mendoza, D. Arias. Implementación de un sistema de caracterización magneto-óptica basado en el efecto Kerr. Presentado en el XXI Congreso Nacional de Física, Barranquilla, Octubre 24-28 de 2005.
- [8] San José Research Center, Hitachi Global Storage Technologies.
- [9] V. Calle, C. Calle, O. Marín, E. Salazar, C. Cortés, W. Lopera, D. Arias, O. Guzmán, P. Prieto, A. Berger, A. Mendoza, "Empleo de un sistema Basado en el efecto Kerr (MOKE) para el estudio de películas magnéticas. Rev. Col. De Fis, **38** (2006) pp.37-40"
- [10] C. Calle, "Influencia del espesor y de la morfología de películas ferritas en la repuesta magneto-óptica superficial a partir del efecto KERR" Tesis de Grado. Maestría en ciencia de los materiales, Universidad del Quindío (2006)
- [11] C. Calle, V. H. Calle, F. Cuellar, A. Cortes, D. Arias, W. Lopera, P. Prieto, o. Guzmán, G. A. Mendoza, Physica. B, **384** (2006) pp 103-105.
- [12] Q. Yan, R.J. Gambino, S. Sampath, L.H. Lewis, L. Li, E. Baumberguer, A. Vahadilla, H. Xiong, Acta Materialia, **52** (2004) pp. 3347-3353
- [13] M. Pal, P. Brama, D. Chakravory, D. Bhattacharyya, H.S. Maiti, J. Magn. Ang Magn. Materials, **164** (1996) pp.256-260.
- [14] V. H. Calle; F. Cuéllar; C. Calle; O. Marín; J. Roa-Rojas; D. Arias; O. Guzmán; W. Lopera, P. Prieto; U. Volkmann; A. Mendoza "Pinning energy of domain walls in MnZn ferrite films", Trabajo sometido al Trends on Novel Materials 2006 – CIAM-CENM-COLCIENCIAS.
- [15] Z. Q. Qiu, J. Pearson, S. D. Bader, Phys. B **46** (1992) pp.468195-468200

7. CUADRO No 1

CUMPLIMIENTO DE ACTIVIDADES Y METAS

OBJETIVOS (del proyecto aprobado)	RESULTADO ESPERADO (según proyecto aprobado)	RESULTADO OBTENIDO	INDICADOR VERIFICABLE	No de Soporte
Estudiar películas magnéticas de $Mn_{0.6}Zn_{0.4}Fe_2O_4$ discriminando la respuesta a lo largo de la superficie por medio de un sistema de caracterización magneto-óptico basado en el efecto kerr	Evaluar superficialmente la respuesta magnetoóptica de las multicapas..	Las expresiones teóricas para el ángulo y elipticidad del efecto kerr se han obtenido teniendo en cuenta efectos superficiales como homogeneidad en el espesor de la muestra	Resultados presentados en eventos nacionales e internacionales.	No. 1 Ver anexo 2
Estudio de la respuesta superficial de películas delgadas en multicapa de $Mn_{0.6}Zn_{0.4}Fe_2O_4$	Evaluar en cada caso la presencia de dominios o defectos magnéticos sobre la superficie. Se emplearán diferentes espesores y número de capas.	La respuesta superficial de las películas fue realizado, indicando la presencia de monodominios y multidominios, en el caso de películas de diferente espesor.	Elaboración de un sistema de posicionamiento XY para la evaluación superficial. Desarrollo de software para la adquisición de datos. Desarrollo de una tesis de pregrado en el tema.	No. 2 Ver anexo 2

PROYECTO 1113-05-137-10 COLCIENCIAS/UNIVERSIDAD DEL QUINDÍO

<p>Implementar un sistema de caracterización magneto-óptica basado en el efecto Kerr.</p> <p>* Ver Publicaciones al final de estas tablas</p>	<p>Implementar un sistema de caracterización magneto-óptica basado en el efecto Kerr.</p>	<p>El sistema ha sido instalado y esta actualmente en funcionamiento. Se ha realizado la calibración del sistema</p>	<p>Equipo en funcionamiento en el laboratorio Kerr Universidad del Quindío. Resultados presentados en Publicaciones a nivel Nacional e Internacional</p>	<p>No. 3 Ver anexo 2</p>
<p>Evaluar la extensión del método a bajas temperaturas.</p>	<p>Analizar desde el punto de vista teórico el efecto que las ventanas de un crióstato tendrían sobre la respuesta MOKE.</p>	<p>Se mostró que la inclusión de un crióstato en el sistema puede ser realizado, teniendo en cuenta la birrefringencia</p>	<p>Se presentó un proyecto ante la Universidad del Quindío, en el cual se evaluarán películas cuya temperatura de Curie son menores a 200K. Se realizará la adquisición del crióstato.</p>	<p>No. 4 Ver anexo 2</p>

**8. CUADRO No 2
INDICADORES DE RESULTADOS PARCIALES**

OTROS RESULTADOS (del proyecto aprobado a dos años)	COMPROMISO ADQUIRIDO (según proyecto aprobado)	LOGROS	No. de Anexo SOPORTE
Fortalecimiento de la capacidad científica nacional	Formación de 2 estudiantes a nivel de maestría.	<p>Formación de 2 Estudiantes a nivel de Maestría Los estudiantes de Maestría han participado directa y activamente en el seminario de formación, desarrollado semanalmente en el instituto. De igual manera participaron en todas las actividades relacionadas con el desarrollo del proyecto en procura de cumplir sus propios objetivos planteados como trabajos de Tesis.</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Una Tesis sustentada por Carlos Calle ✓ Premio al mejor trabajo de Investigación de la Facultad de Ciencias Básicas y Tecnologías (2005-2006) ✓ Tesis en desarrollo próximo a entregar su tesis Hugo Calle ✓ Tesis iniciada en el tema. Fabián Cuéllar. 	<ul style="list-style-type: none"> 3. Título 4. Tesis de Grado Sustentada. 5. Certificado del Premio a mejor trabajo 6.a. Tesis de grado por finalizar 6.6. Tesis de grado iniciada

	Formación de 0 estudiantes a nivel de pregrado	Desarrollaron su trabajo de grado 2 estudiantes a nivel de pregrado : Ellen Elizabeth Vega y Edgar Andrés Marín Dos estudiantes de pregrado en Ingeniería Electrónica desarrollaron y sustentaron su trabajo de grado en el grupo. La tesis realizada: “Posicionador automático de portamuestras”. Trabajo sustentado el 7 de Marzo de 2005	7. Constancia de grado, y resumen del trabajo de Grado
		Al laboratorio se vincularon dos estudiantes de pregrado en química e ingeniería electrónica, como auxiliares de investigación, con el fin de capacitarlos en el trabajo interdisciplinario, quines actualmente desarrollan sus trabajos de grado en el area de magnetismo.	8. Certificado de vinculación como auxiliares de investigación.
		Creación de un Semillero de Investigación en materiales magnéticos	9. Carta de aprobación del Semillero
	Consolidar la redes de investigación	Se creó un grupo de Investigación especializado en materiales magnéticos “Grupo de Materiales Magnéticos y Nanoestructuras”, que permitirá el desarrollo de nuevos proyectos en el área. Generación de convenio de colaboración con el Centro de Investigación en ciencia e ingeniería de los materiales. Participación en el Centro de Excelencia de Nuevos Materiales	10. Creación de grupo en Materiales Magnéticos 11. Convenio con el CICIMA 12. Convenio Universidad de Madrid 13. CENM

	<p>Creación de nuevas conexiones con el grupo de caracterización de materiales de la Universidad Católica de Chile</p>	<p>Visita del Investigador Principal del proyecto al Laboratorio de Nuevos Materiales en la Universidad Católica de Chile. Visita del estudiante Carlos Calle, vinculado a este proyecto al Laboratorio de Nuevos Materiales en la Universidad Católica de Chile.</p> <p>Se realizó la visita del Asesor Internacional del Proyecto (Universidad Católica de Chile) a la Universidad del Quindío. Estuvo en nuestro laboratorio durante la última semana del mes de Octubre de 2005. Se adaptó el sistema MOKE existente para la implementación de un sistema de elipsometría y, se discutió la técnica experimental. Se intercambiaron conceptos sobre el sistema implementado en UQ y los resultados obtenidos. Se realizó intercambio de muestras para el proceso de ajuste y calibración del sistema.</p>	<p>14. Esta visita se programó en el marco del <i>CIAM-CIMAT-CONICYT Workshop Frontiers in Material Research</i>, por invitación de Colciencias. Abril 29-30 de 2004.</p> <p>15. Certificado de Visita del profesor Volkman 16. Certificado de Actividades del estudiantes en Chile. 17. Certificado actividades Aminta Mendoza en Chile</p>
	<p>Participación en 1 evento de carácter Nacional y/o Internacionales</p>	<p>Participación en el 49th Conferencia en Magnetismo y materiales magnéticos Se presentó un trabajo en el evento titulado "<i>Influence of a non magnetic dilution on the magnetic properties of the $Zn_xCd_{1-x}C_2S_4$ system by means of Microwave Magnetic Resonance</i>"</p>	<p>18. Resumen Publicado en el Volumen 49. Número 1. del MMM</p>

		<p>VII Latinoamerican Workshop on MMM 2005. Se presentó en Diciembre el trabajo: "Magneto-Optical Kerr Effect of ferromagnetic spinel Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe₂O₄ films"</p>	19. Resumen Publicado
		<p>Participación en la VI Escuela Nacional de Física de la Materia Condensada. Medellín Se realizó una participación de los miembros del grupo, y se asistieron a charlas especializadas en el tema de caracterización óptica</p>	20. Los resúmenes publicados memorias VI Escuela Nacional de Física de la Materia Condensada. Medellín
		<p>Presentación de Trabajos en el XXI Congreso Nacional de Física Se presentaron dos trabajos titulados "Implementación de un sistema de caracterización magneto-óptica basado en el efecto Kerr" y "Distribuciones histeréticas en ferromagnéticos blandos"</p>	21. Los resúmenes fueron publicados en el Volumen 21 del CNF
	Capacitación	<p>Asistencia al Encuentro Física y Sociedad Se presento un trabajo enfocado a los empresarios colombianos. Se presentó el trabajo "Estudio de Materiales Magnéticos por medio del MOKE"</p>	22. Se asistió a este evento por invitación de colciencias. Septiembre de 2005
		Participación de estudiantes en el Seminario "Simulaciones Monte Carlo aplicadas a Sistemas Magnéticos"	23. Certificados
		Capacitación de estudiantes en el uso del software: Lab-view	24. Certificados
	*Publicaciones 1 articulo	2 Internacionales publicados 2 Nacionales publicados	25. Publicaciones realizadas:

	Internacional sometido y 1 Nacional sometido		26. Journal of Applied Physics, vol. 97, No. 10, partes 2 & 3, 15 mayo de 2005 27. Physica B. Sometido en Noviembre de 2005 28. 2 artículos .Rev. Col. De Física Publicaciones sometidos en Octubre de 2005.
--	---	--	--

9. ANEXOS

ANEXO1

IMAGENES

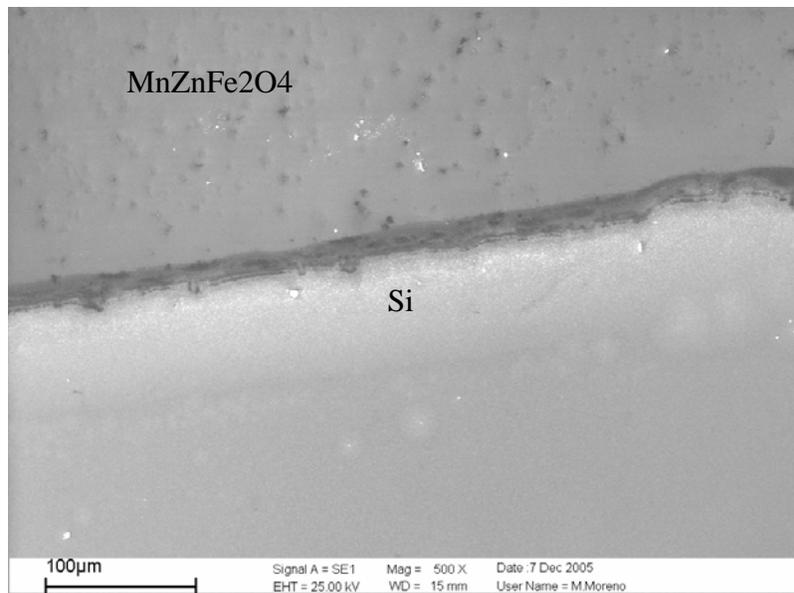


Fig. 1. Imágenes de SEM mostrando escalones generados en las muestras

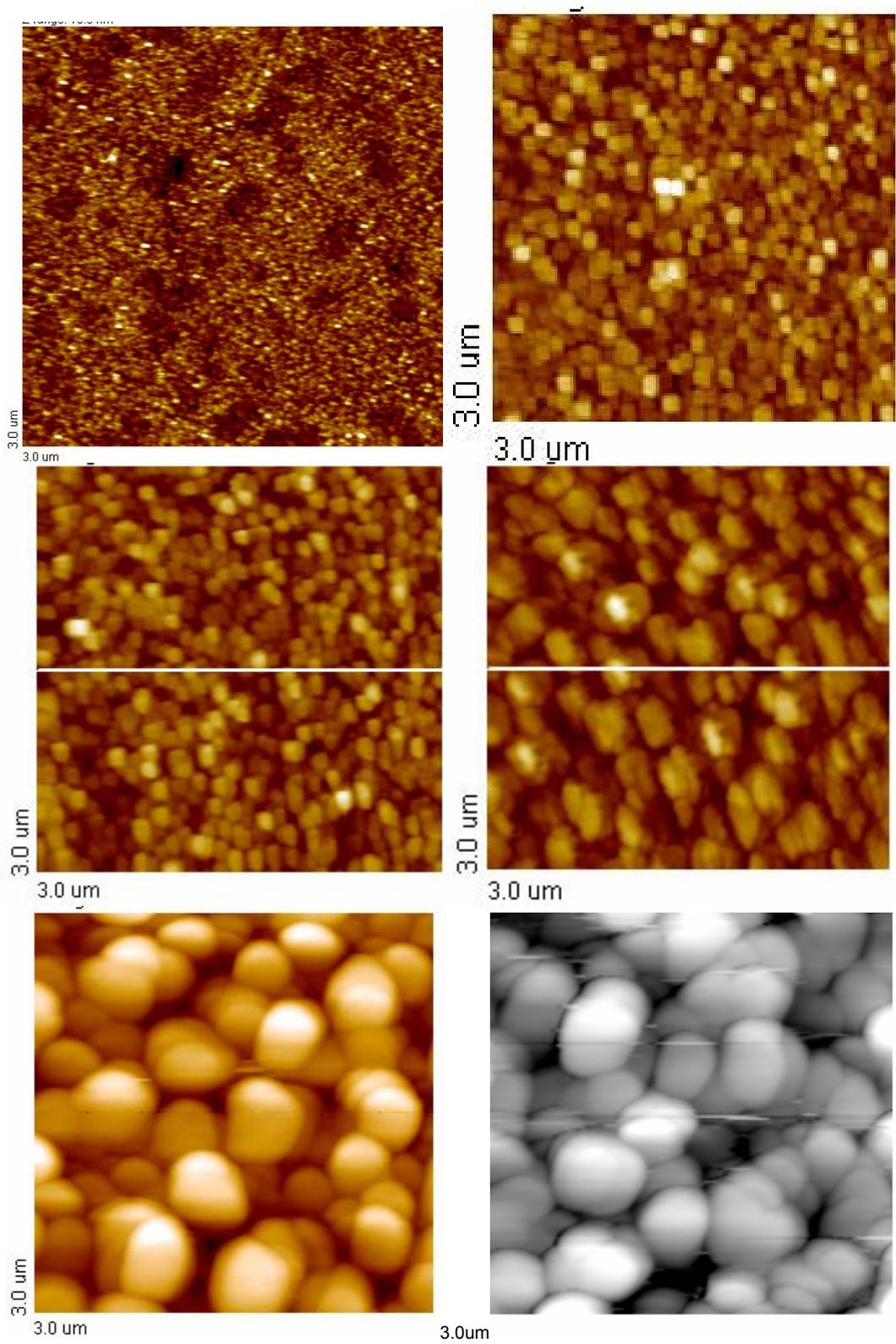
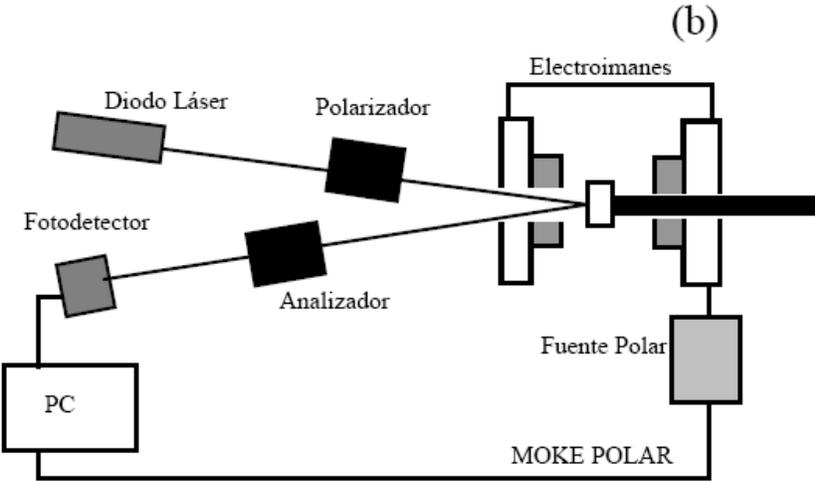
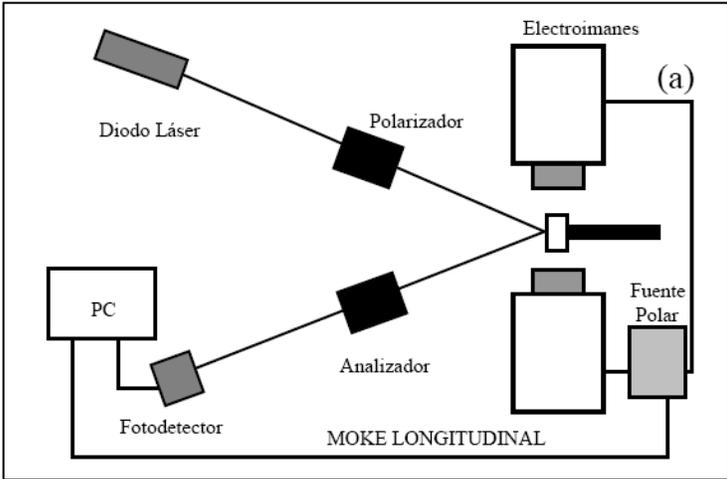


Fig. 2. Imágenes de AFM para las muestras a.7S(7min), μ , c. 1S(15min, 14μ), d. 2S(30min, 12μ), b. 9S(45min, 17μ), e. .6S(77min) f.5S(90 min),



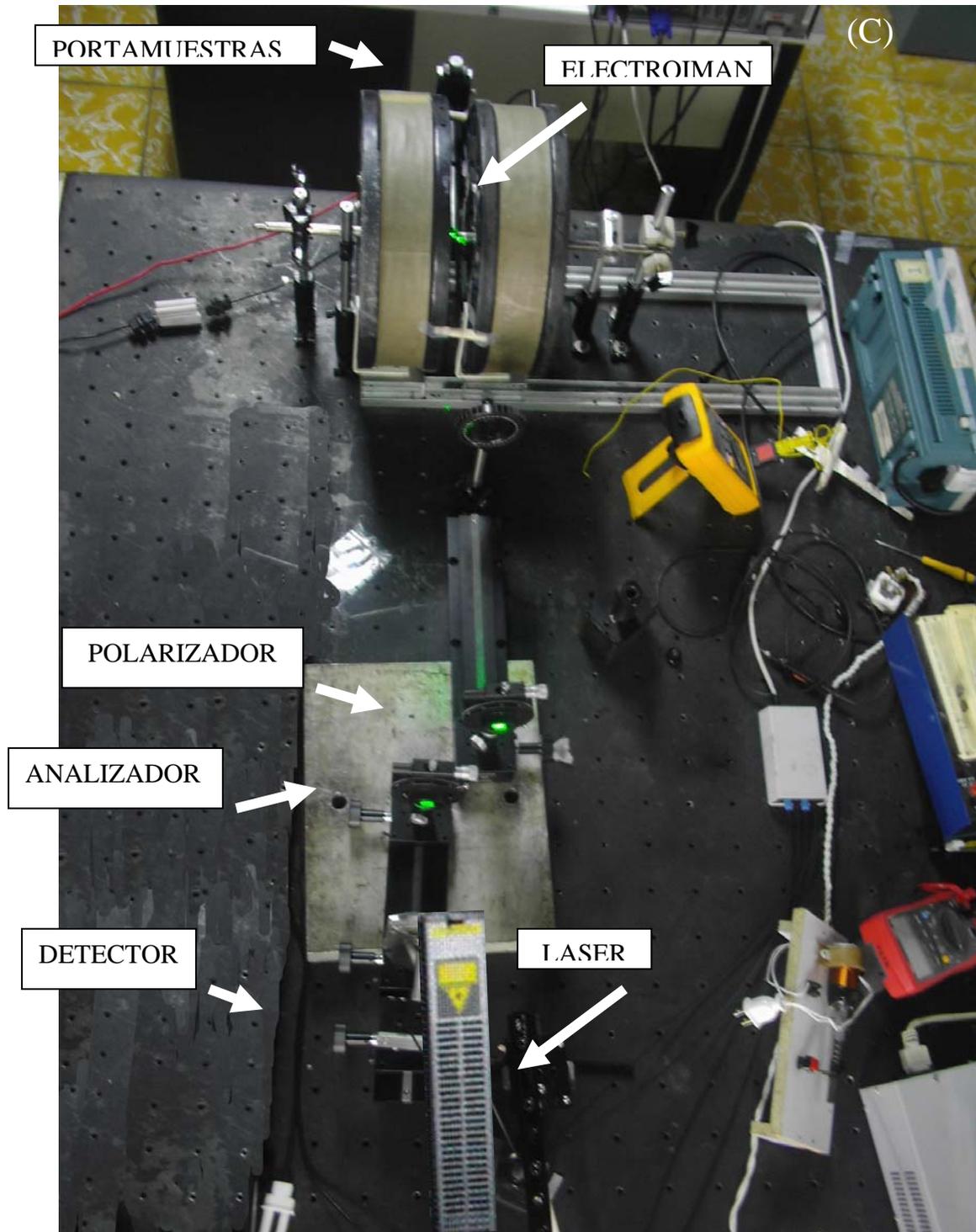


Fig. 3. a. Representación esquemática de la geometría longitudinal del sistema MOKE.
b. Representación esquemática de la geometría polar del sistema MOKE
c. Fotografía del sistema MOKE configuración transversal y/o longitudinal.

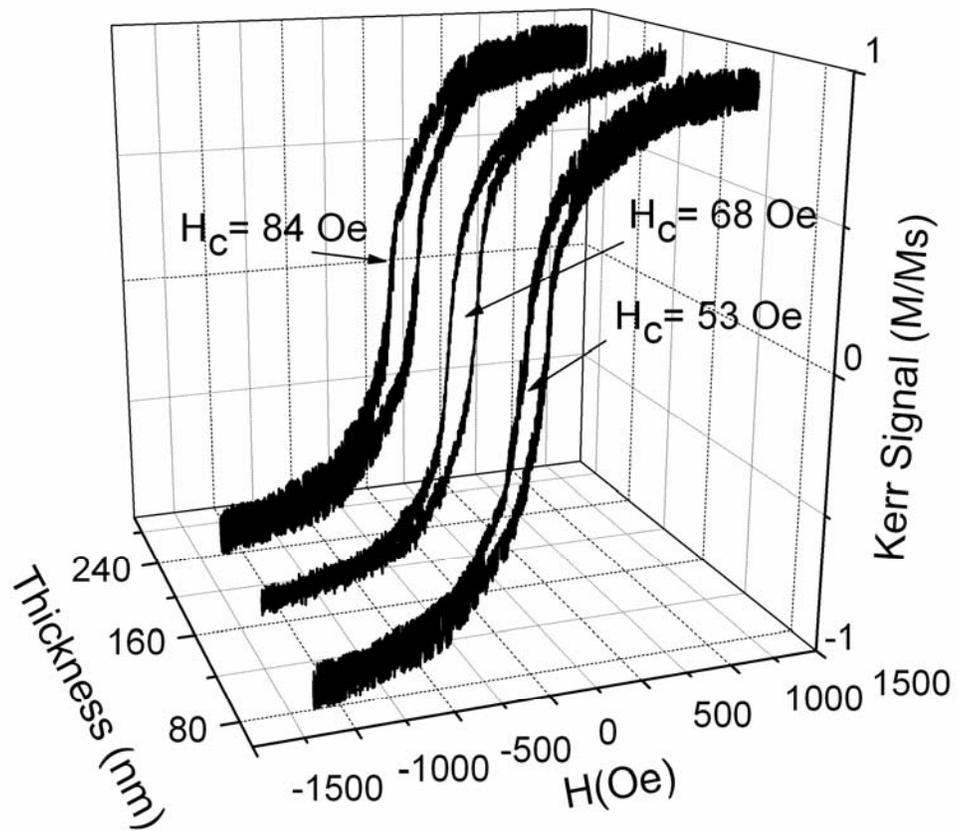


Fig. 4 Curvas de histéresis de ferritas de NiZn, como función del espesor

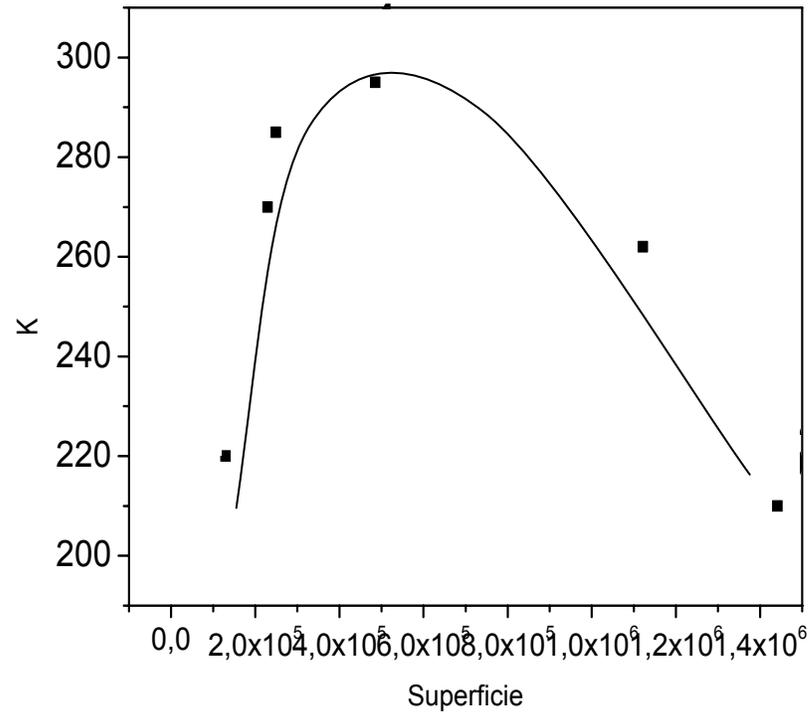


Fig.5. Parámetro de Anclaje Vs. Superficie de Grano.

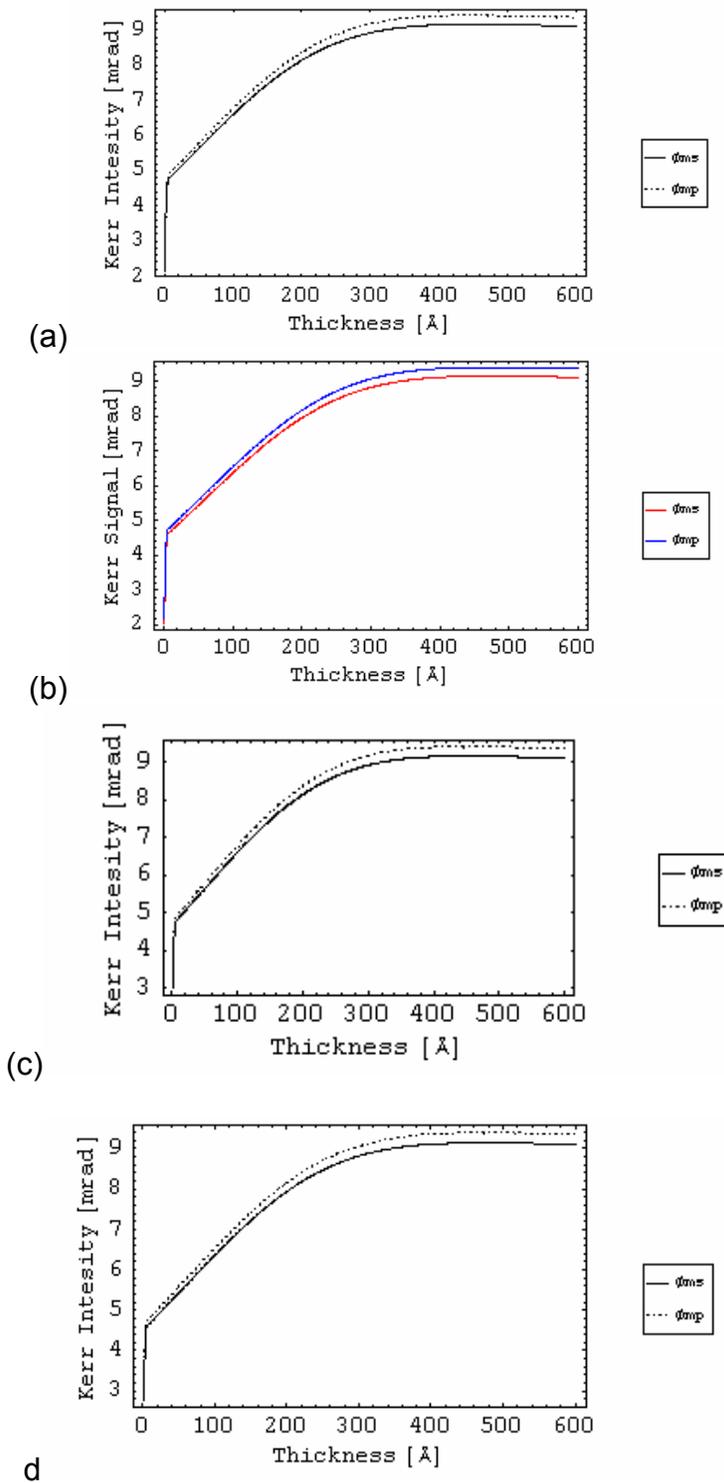


Fig. 6. Simulación de la respuesta Kerr como función del espesor de multicapas de crecidas sobre diferentes sustratos, con ϕ_{ms} la componente s del campo eléctrico y ϕ_{mp} la componente p del campo eléctrico, para . (a) $\text{Mn}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Si}$ (b) $\text{Ni}_{0.75}\text{Zn}_{0.25}\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Si}$ (c) $\text{Mn}_{0.75}\text{Zn}_{0.25}\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{SrTiO}_3$ (d) $\text{Ni}_{0.75}\text{Zn}_{0.25}\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{SrTiO}_3$

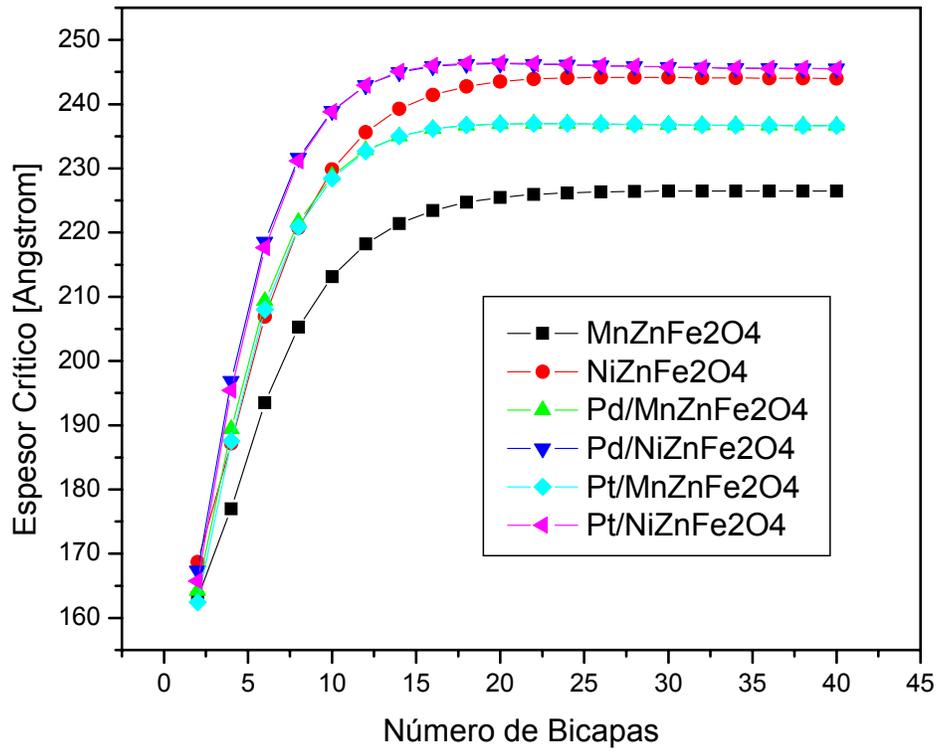
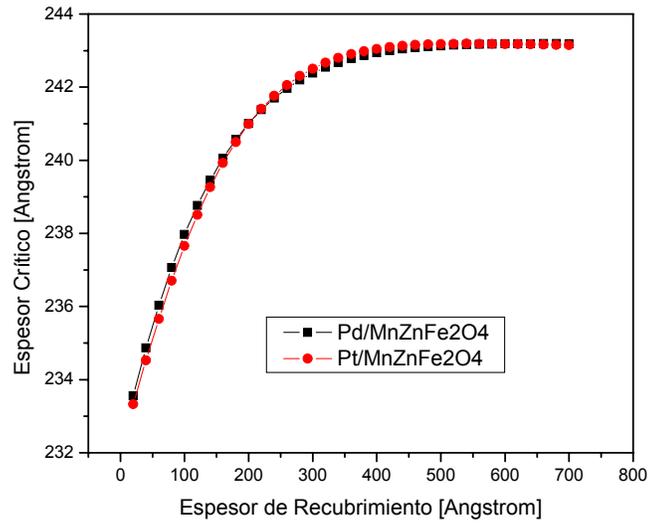
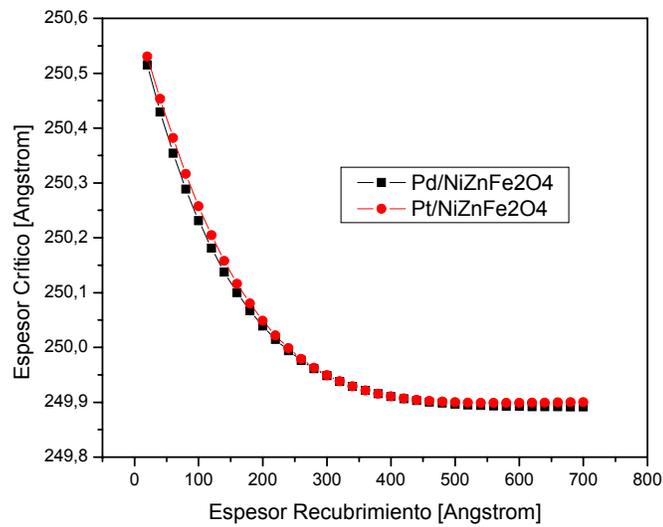


Fig.7. Espesor Crítico Vs Número de Bicapas.



(a)



(b)

Fig.8. Curvas que identifican los valores de espesor crítico usando recubrimiento de Pd y Pt sobre (a) MnZnFe₂O₄/Fe y (b) NiZnFe₂O₄/Fe

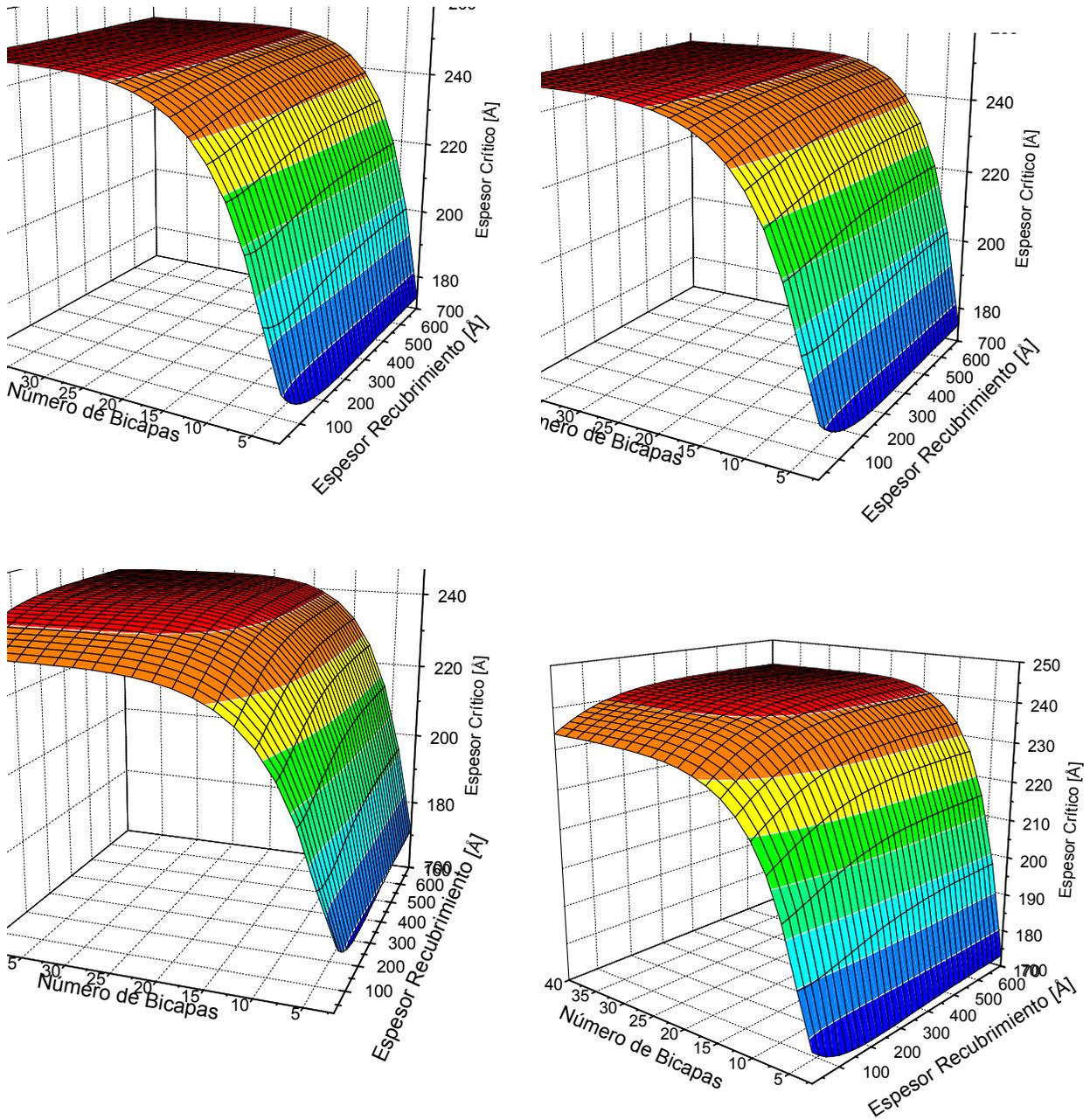


Fig.9. Superficie crítica, por debajo de la cual la respuesta predominante se origina en el efecto Faraday. Por encima de las curvas la respuesta corresponde predominantemente a un efecto Kerr. (a)Pt/NiZnFe₂O₄/Fe , (b)Pd/NiZnFe₂O₄/Fe , (c)Pt/MnZnFe₂O₄/Fe , (d)Pd/ MnZnFe₂O₄/Fe

ANEXO 2

SOPORTES DE OBJETIVOS

1. Resultados de los estudios realizados sobre las películas magnéticas y multicapas magnéticas

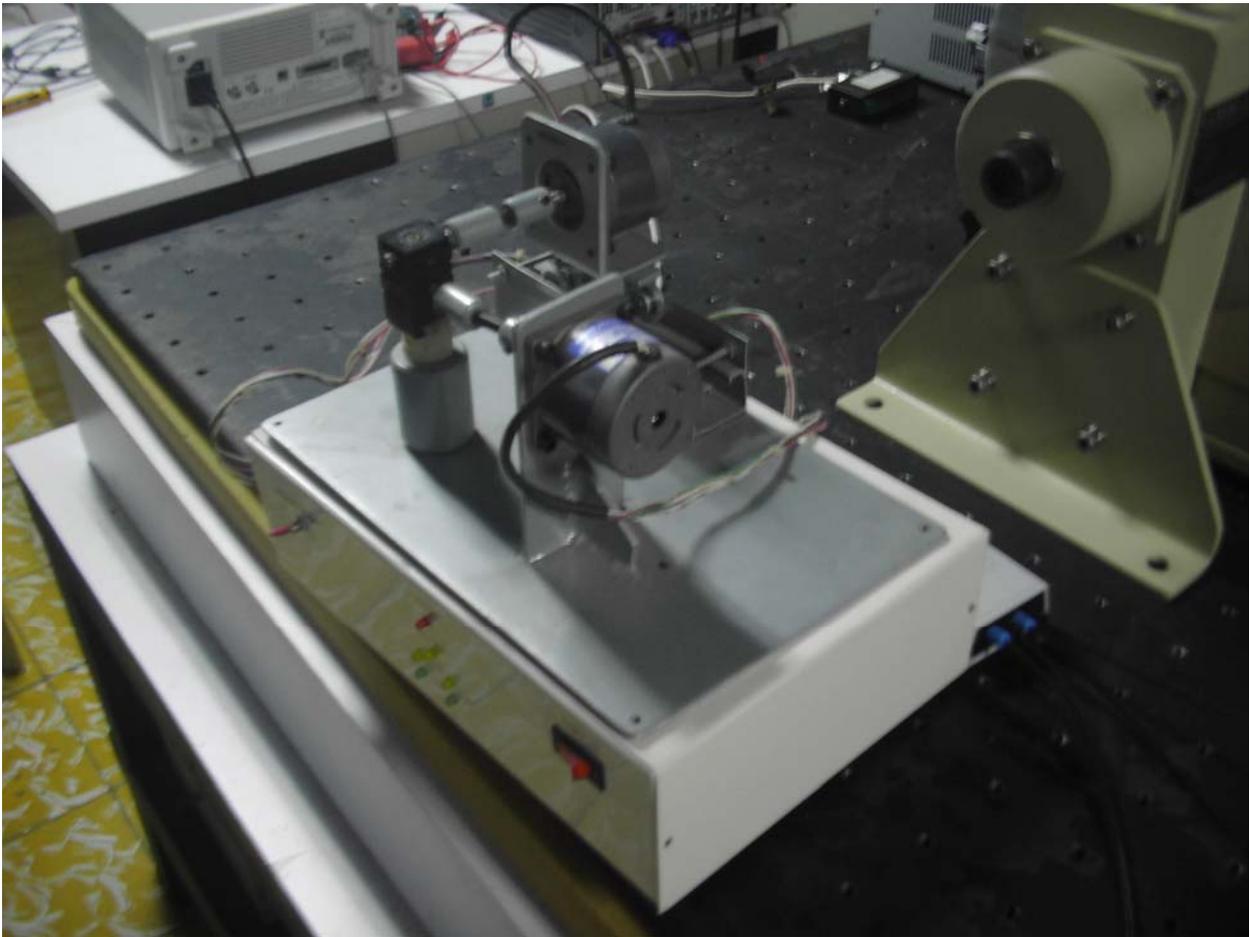
PUBLICACIONES

Anexas al informe escrito

**2. Sistema de Caracterización Magneto-Óptica basado en el efecto Kerr
INSTALADO EN LA FACULTAD DE CIENCIAS BASICAS Y TECNOLOGIAS DE LA
UNIVERSIDAD DEL QUINDIO**



3. POSICIONADOR DISEÑADO DENTRO DEL PROYECTO E INTERFAZ PARA EL CONTROL AUTOMÁTICO



**4. Resultado del estudio de implementación de sistema de bajas temperaturas
para la realización de medias MOKE**

PRESENTACION DE PROYECTO DE INVESTIGACION ANTE LA FACULTAD DE
CIENCIAS BASICAS Y TECNOLOGÍAS, PARA SU DESARROLLO EN 2007

**ESTUDIO DEL “EFECTO DE INTERACCIÓN POR POLARIZACIÓN DE
INTERCAMBIO” EN BICAPAS DE PELÍCULAS DELGADAS DE NiZnFeO y
LaCaMnO”**

INVESTIGADOR PRINCIPAL

DIEGO ARIAS SERNA

GRUPO DE MATERIALES MAGNETICOS Y NANOESTRUCTURAS

PROGRAMA DE FISICA
UNIVERSIDAD DEL QUINDIO

FICHA TECNICA

MODALIDAD COFINANICACION		
Entidades Participantes:	Universidad del Quindío	
	Universidad de Madrid	
Tiempo de Duración :	1 año	
Título del Proyecto:		
ESTUDIO DEL “EFECTO DE INTERACCIÓN POR POLARIZACIÓN DE INTERCAMBIO” EN BICAPAS DE PELÍCULAS DELGADAS DE NiZnFeO y LaCaMnO”		
RESUMEN:		
<p>Se plantea el estudio del efecto de Interacción por polarización de intercambio (Exchange Bias) en bicapas de NiZnFeO y LaCaMnO. Estas bicapas serán preparadas por la técnica de Pulverización Catódica. La fabricación de las monocapas y su caracterización utilizando técnicas como DRX, AFM, SEM serán elementos fundamentales para la fabricación de las bicapas.</p> <p>La respuesta magnética de las bicapas será obtenida por las técnicas de Efecto Kerr y SQUID. Con base en dichos resultados se realizará un estudio teórico que permita aportar elementos al entendimiento del Exchange Bias.</p> <p>Se considerará el efecto de parámetros involucrados, tales como la interfase, anisotropía, la rugosidad, el espesor de las bicapas, la configuración de los espines o de los dominios magnéticos.</p>		
Responsable del Proyecto: Diego Arias Serna		
Coinvestigadores: Octavio Guzmán, Aminta Mendoza		
Auxiliares de Investigación:	1 Estudiante de Química	1 Estudiante de Ing. Electrónica
Estudiante Investigador	1 Estudiante de Química	
Monto Solicitado a la Universidad del Quindío	\$29.263.600	
Monto Correspondiente a Cofinanciación	USD \$ 2500	

INFORME FINANCIERO CUADRO No 1

Fuentes: Colciencias- Uniquindío	Código:1113-05-137-10		Convenio/contrato 230-2003					
	Aportes de COLCIENCIAS				Contrapartida			
Rubros	Total aprobado (1)	Total desembolsado (2)	Total ejecutado (3)	Ejecutado durante este período	Total aprobado (1)	Total desembolsado (2)	Total ejecutado (3)	Ejecutado durante este período
1. Personal de la entidad contratado para el proyecto	24 000 000	24 000 000	24 000 000	0	114 000 000	114 000 000	114 000 000	7 125 000
2. Equipos, Equipo propio, Adquirido o arrendado	0	0	0	0	55 000 000	55 000 000	55 000 000	0
3. Materiales	50 000 000	50 000 000	50 000 000	5 696 517	60 000 000	60 000 000	60 000 000	300 000
4. Construcciones	2 000 000	2 000 000	2 000 000	0	4 000 000	4 000 000	4 360 193	0
5. Viajes	0	0	0	0	0	0	0	0
6. Viajes	3 000 000	3 000 000	3 000 000	1 000 000	12 400 000	12 400 000	12 357 336	486 300
7. Medios de transporte propios, adquiridos o alquilados	0	0	0	0	0	0	0	0
8. Bibliografía	1 500 000	1 500 000	1 500 000	907 000	3 000 000	3 000 000	3 000 125	125 000
9. Publicaciones y patentes	0	0	0	0	2 000 000	2 000 000	1 610 286	700 000
10. Adecuaciones	0	0	0	0	500 000	500 000	500 000	500 000
11. Administración	0	0	0	0	0	0	0	0
12. Servicios técnicos y consultorías	0	0	0	0	0	0	0	0
13. Gastos de propiedad industrial/intelectual	0	0	0	0	0	0	0	0
14. Imprevistos	0	0	0	0	0	0	0	0
14. Descuentos y deducciones	0	0	0	0	0	0	0	0
TOTALES	80 500 000	80 500 000	80 500 000	7 603 517	250 900 000	250 900 000	250 827 940	9 236 300

AMINTA MENDOZA (INVESTIGADORA PRINCIPAL)

CONTADOR O REVISOR FISCAL

CUADRO No 2

INVESTIGADOR	SUELDO(2005) (UNIQUINDIO)	SUELDO(2006) (UNIQUINDIO)	Horas/ semana.	15 Abril 2005 15 Marzo-2006	Total
				12 meses	24 meses
H. ARIZA	7.100.000	7.500.000	5	10.100.000	21.300.000
A. MENDOZA	2.700.000	2.700.000	20	14.700.000	30.700.000
D. ARIAS	4.100.000	4.600.000	10	12.400.000	25.500.000
E. SALAZAR	1.000.000	1.100.000	5	1.025.000	2.725.000
O. GUZMAN	3.000.000	3.000.000	10	7.900.000	16.950.000
W. LOPERA	4.129.000	4.129.000	5	10.825.000	16.825.000
TOTALES				56.950.000	114.000.000

* Certificado espedido por el Jefe de la División de Talento Humano, será anexada al informe final como soporte de este rubro

CUADRO No 3.1

EQUIPO ADQUIRIDO, ARRENDADO O PROPIO							
FECHA DE PAGO	No. FACTURA	No. COMPROBANTE DE PAGO	DESCRIPCIÓN	COLCIENCIAS	CONTRAPARTIDA Uniquindío	PROVEEDOR	PAIS DE ORIGEN DE LOS EQUIPOS
Mayo 31/2006	2871	14005	Traspaso fondos adecuaciones - Aire Acondicionado	150.000	300.000	Reactivos Equipos y Quimicos LTDA.	Colombia
Octubre 31/2005	Contrato 012	Registro presupuestal 9992	Pago contrato 012 (ver tabla 3.2)	25.009.140	0	Bioinstrumental LTDA.	USA
Septiembre 2006	Contrato 2	15239	Partes y elementos requeridos en el montaje del electroimán y su sistema óptico (ver tabla 3.3)	3.106.620	0	Bioinstrumental LTDA.	USA
Mayo 9/06	Contrato 2	Registro presupuestal 3077	Partes y elementos requeridos en el montaje del electroimán y su sistema óptico (ver tabla 3.3)	2.439.900	0	Bioinstrumental LTDA.	USA
TOTAL EQUIPOS				30.705.660	300.000		

3.2 equipos contrato 012
Electromagneto 5403 /gmw
Sistema de refrigeracion mc-50-e1-h1-j1 /gmw
Soporte de montaje vertical 17612640 /gmw
Montura de la punta de prueba 11901280 /gmw
Par de polos 17901520/gmw
Teslámetro mg-10d /walkerscientific
Sonda hall hp-10-040-te /walkerscientific
Sonda hall hp-10-250-ae /walkerscientific
Montura de la punta de prueba 11901280 /gmw

3.3 EQUIPOS CONTRATO 2
2 Bases Magnéticas
1 Plastic compartment box
5 Portapostes
6 Postes, 1 Riel con vagón
1 Socket Head cap screw kit - metric
1 Socket Head cap screw kit - English
1 Vagón

CUADRO No 4

BIBLIOGRAFIA						
FECHA DE PAGO	No. FACTURA	No. COMPROBANTE DE PAGO	DESCRIPCIÓN	COLCIENCIAS (Pesos)	CONTRAPARTIDA Uniquindío (Pesos)	PROVEEDOR
Agosto 17/2006	0579	15229	Magnetic Fundamentals and Device App.	772.000	0	Librería Primavera
Septiembre 2006	Registro Presupuestal	6135	Libros: Instrumentación, Diccionario Ingles-Español Diccionario Español	135.000	125.500	Librería Primavera
TOTAL				907.000	125.500	

CUADRO No 5

VIAJES					
FECHA DE PAGO	No. FACTURA	No. COMPROBANTE DE PAGO	DESCRIPCIÓN	COLCIENCIAS	CONTRAPARTIDA Uniquindío
Abril 17/2006	15304	13342	Viaje Carlos Calle (Pasantía Chile)*	1.000.000	486.300
TOTAL				1.000.000	486.300

* Se anexa Constancia

CUADRO No 6

Publicaciones						
FECHA DE PAGO	No. FACTURA	No. COMPROBANTE DE PAGO	DESCRIPCIÓN	COLCIENCIAS	CONTRAPARTIDA Uniquindío	PROVEEDOR
Septiembre 2006	Registro Presupuestal	6134	Publicación Artículo: Physica B	0	700.000	Elsevier
Total				0	700.000	

CUADRO No 7

Adecuaciones						
FECHA DE PAGO	No. FACTURA	No. COMPROBANTE DE PAGO	DESCRIPCIÓN	COLCIENCIAS	CONTRAPARTIDA Uniquindío	PROVEEDOR
Mayo 31/2006	2871	14005	Aire Acondicionado	0	500.000	Reactivos Equipos y Quimicos LTDA.
Total				0	500.000	