

INTRODUCCIÓN

En este trabajo se estudiaron, usando simulaciones Monte Carlo, los estados de equilibrio de películas magnéticas bicapa caracterizadas por una fuerte anisotropía perpendicular a su plano.

Cada película (capa) se modeló como una red discreta con espines, del tipo Ising bidimensional, con interacciones de corto alcance ferromagnéticas y antiferromagnéticas, e interacciones dipolares de largo alcance. La bicapa consiste en dos redes cuadradas superpuestas y concéntricas. La energía del sistema se puede descomponer en términos de la energía de cada subred o capa, y de la energía interacción entre las capas.

El Hamiltoniano del sistema es

$$H = -J_1 \sum_{\langle i,j \rangle} S_i S_j - J_2 \sum_{\langle i,j \rangle} \sigma_i \sigma_j + g_1 \sum_{\langle i,j \rangle} \frac{S_i S_j}{r_{ij}^3} + g_2 \sum_{\langle i,j \rangle} \frac{\sigma_i \sigma_j}{r_{ij}^3} - J_3 \sum_i S_i \sigma_i$$

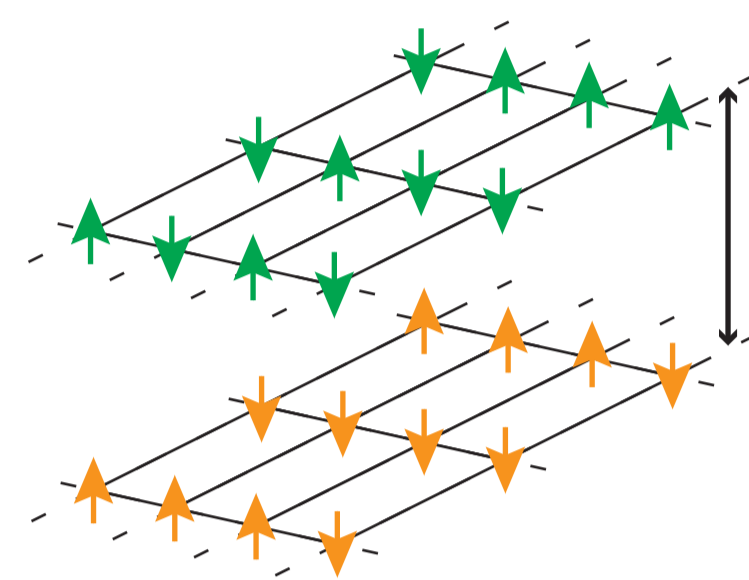
(espines de la capa 1: $S = \pm 1$, espines de la capa 2: $\sigma = \pm 1$)

Interacciones de intercambio.
 $J_1 > 0$ y $J_2 > 0$.
Sumas a primeros vecinos.

Interacciones dipolares entre espines dentro de una misma capa, a una distancia r_{ij} entre sí. Se consideró $g_1 = g_2 = g$, con $g > 0$.

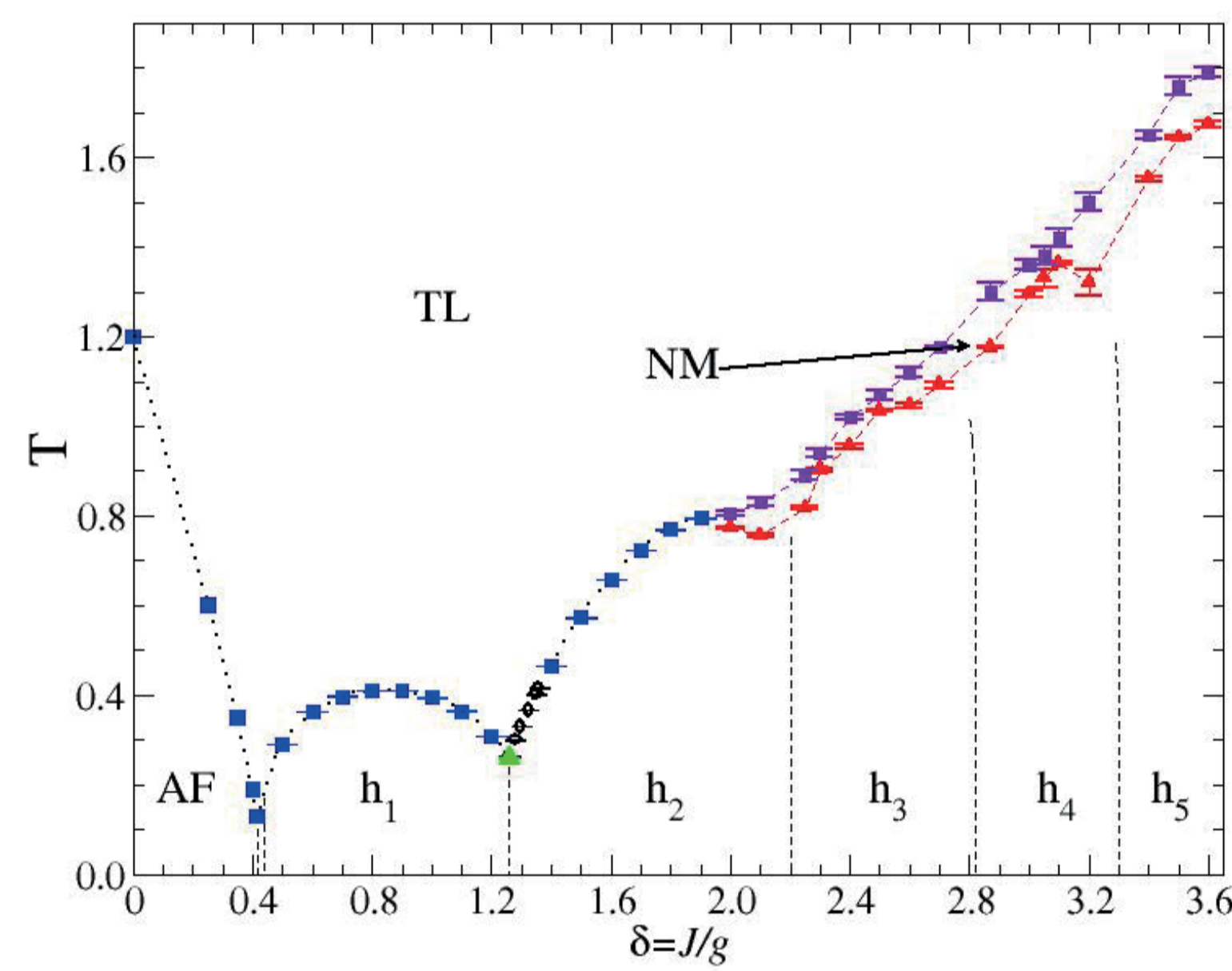
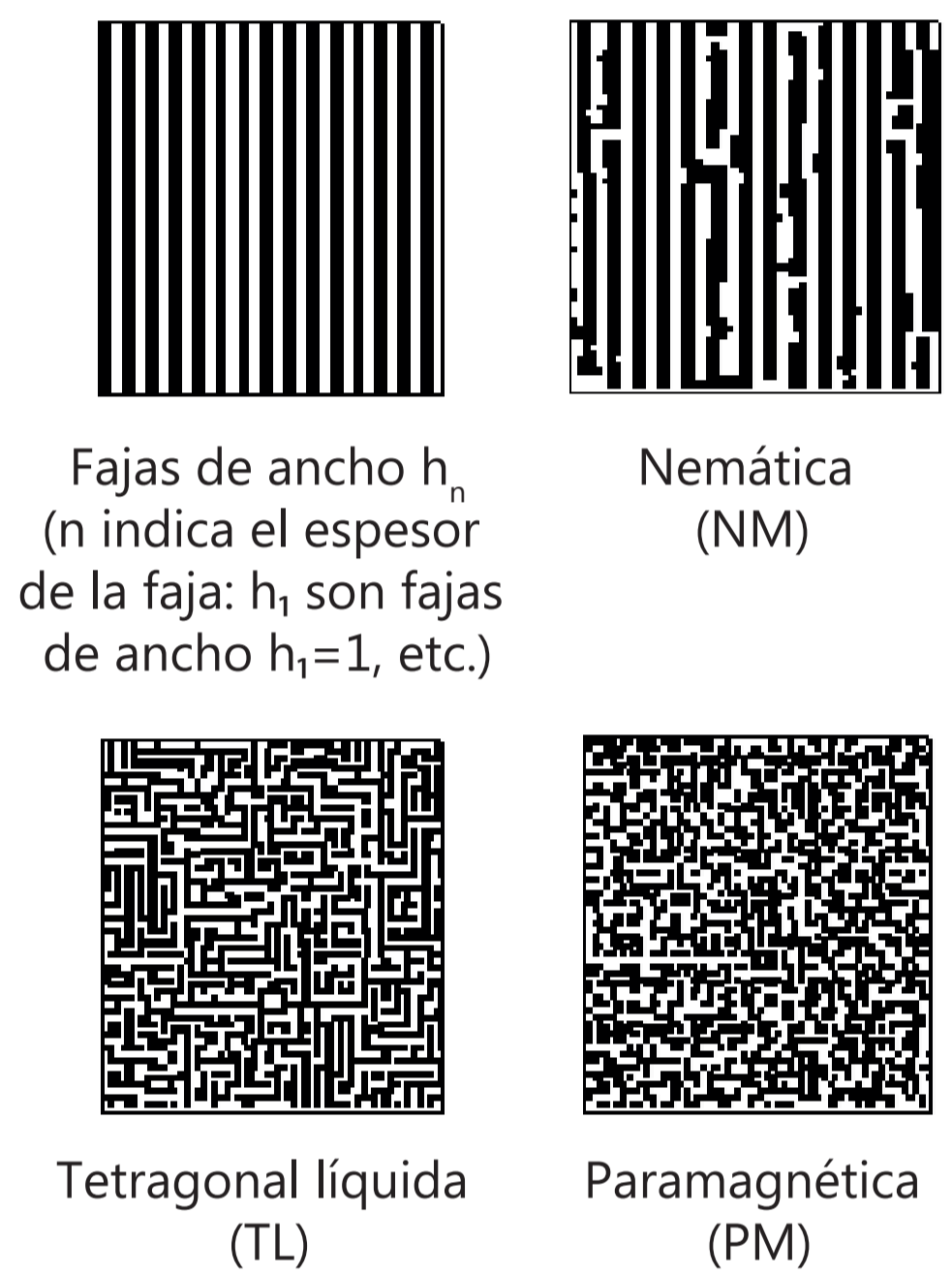
Interacción entre capas.
 $J > 0$ ferromagnética.
 $J < 0$ antiferromagnética.

Se consideraron:
 $g = 1$
 $J_1 = 1$
 $J_2 = 1,5$
 $J_3 = \pm 0,5; 1,25$



En este tipo de bicapas, formadas por capas ferromagnéticas, la constante de intercambio J_3 oscila entre ferromagnética o antiferromagnética dependiendo del espesor de la película no-magnética.

Diagrama de fases y estructuras de dominios magnéticos observadas en monocapas



METODOLOGÍA

Se realizaron simulaciones Monte Carlo para el sistema de tamaño $N = L^2$, con $L = 128$, en un baño térmico a temperatura T . La evolución dinámica hacia los estados de equilibrio a cada T se realizó mediante el algoritmo Metrópolis. Para considerar adecuadamente los efectos de tamaño finito, debido al corte en el alcance de las interacciones dipolares, se implementaron condiciones de contorno periódicas mediante sumas de réplicas del sistema de acuerdo con el criterio de Ewald.

Observables del sistema:

– Parámetro de orden orientacional $O_{hv} = \frac{n_v - n_h}{n_v + n_h}$

Donde n_v y n_h es el número de enlaces verticales u horizontales, respectivamente, entre primeros vecinos antiparalelos.

$O_{hv} = +1$ (-1) cuando el sistema está ordenado con franjas verticales (horizontales)
 $O_{hv} = 0$ en las fases TL y PM.

– Susceptibilidad $\chi = \frac{T}{N} (\langle O_{hv}^2 \rangle - \langle O_{hv} \rangle^2)$

– Segundo momento del parámetro de orden $O_{hv}^2 = \langle O_{hv}^2 \rangle$

Dinámica de tiempos cortos

En la dinámica de tiempos cortos se analizan series temporales de los observables cuando la configuración inicial del sistema parte de alguno de sus puntos fijos triviales: estado fundamental ($T = 0$, configuraciones tipo fajas) y fase paramagnética ($T = \infty$).

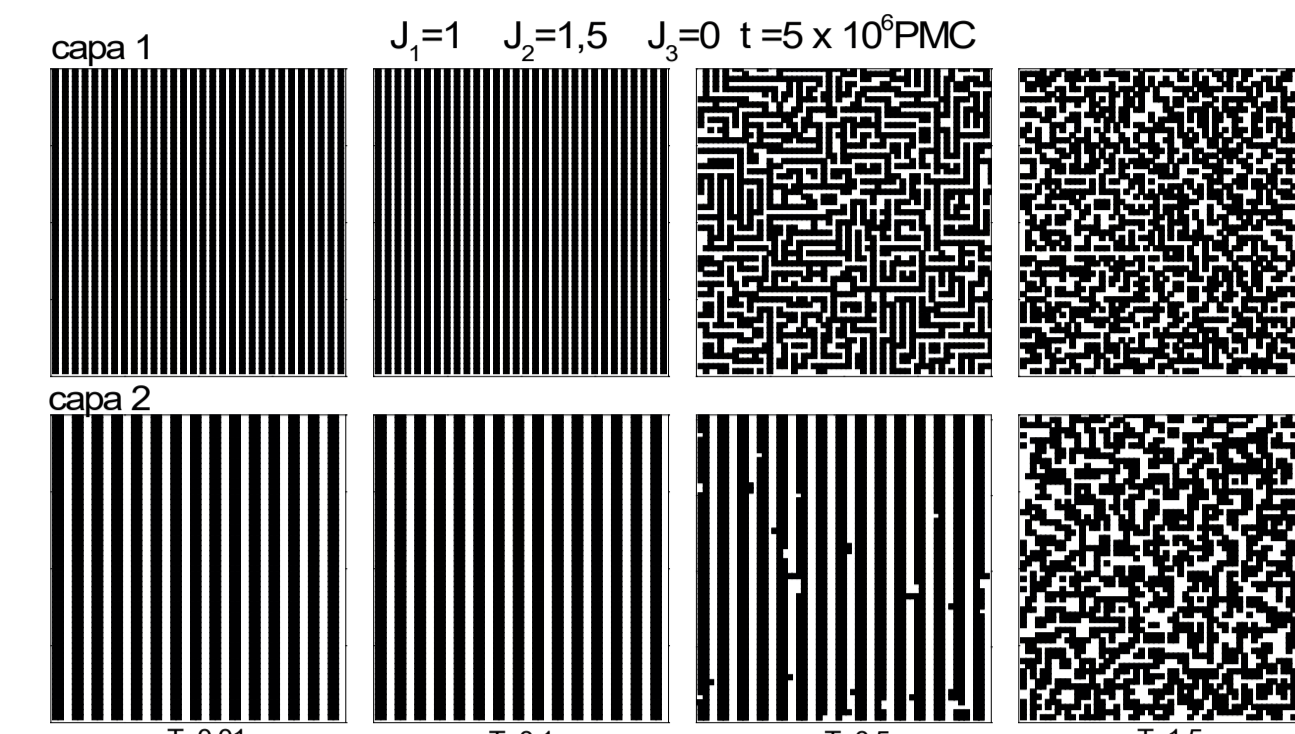
Para transiciones de fase continuas se espera que estos observables tengan un comportamiento de ley de potencia en el punto crítico (T_c), con exponentes que se relacionan con los de la transición.

Cerca del punto crítico se propone:

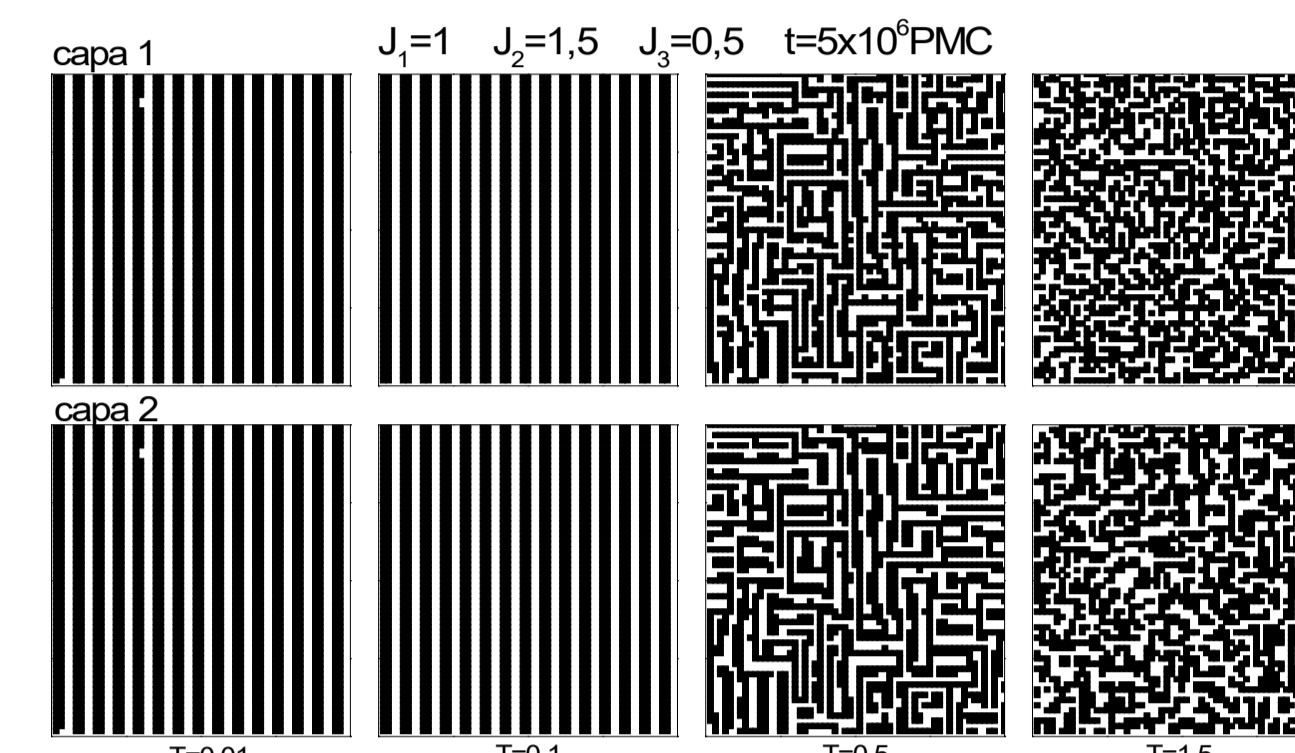
$$\begin{aligned} \text{Para } T = 0 & & \text{Para } T = \infty \\ O_{hv}(t) &\propto t^{-\beta/\nu z} & O_{hv}^2(t) = \chi(t) &\propto t^{\gamma/\nu z} \\ \chi(t) &\propto t^{\gamma/\nu z} & & \end{aligned}$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

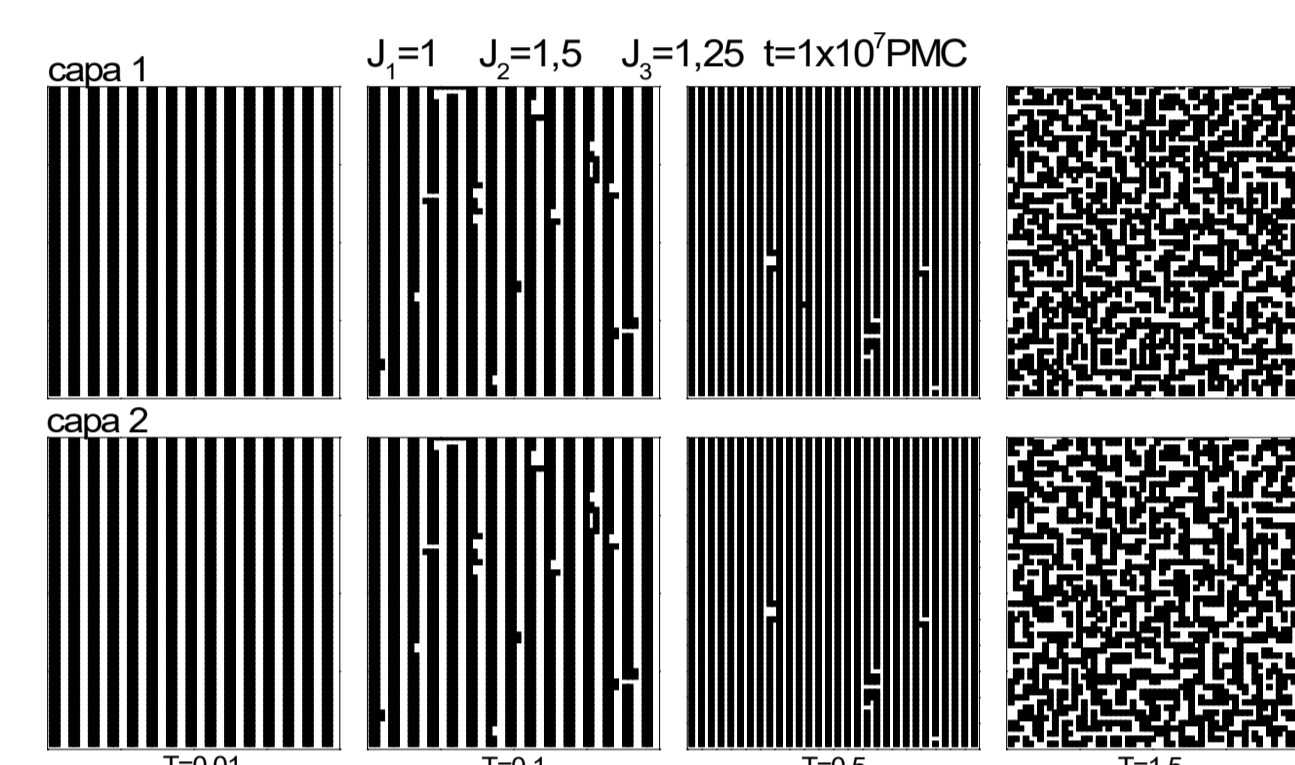
Se obtuvieron las estructuras de dominios magnéticos de equilibrio a distintas temperaturas.



En el caso sin acoplamiento entre capas (monocapas), a bajas temperaturas ambas capas presentan estructuras de dominios tipo fajas de ancho h_1 para la capa 1 y h_2 para la capa 2.
Al aumentar la temperatura ambas capas se desordenan hacia la TL. Dicha transición ocurre a distintas temperaturas para cada capa, siendo menor para la capa 1.



Para capas débilmente acopladas ($J_3 = 0,5$), a bajas temperaturas se acoplan ferro o antiferromagnéticamente, de acuerdo al valor de J_3 , mostrando la misma estructura de dominios tipos fajas h_2 . Al aumentar la temperatura ambas capas se desordenan hacia la TL. Se evidencia una única transición.

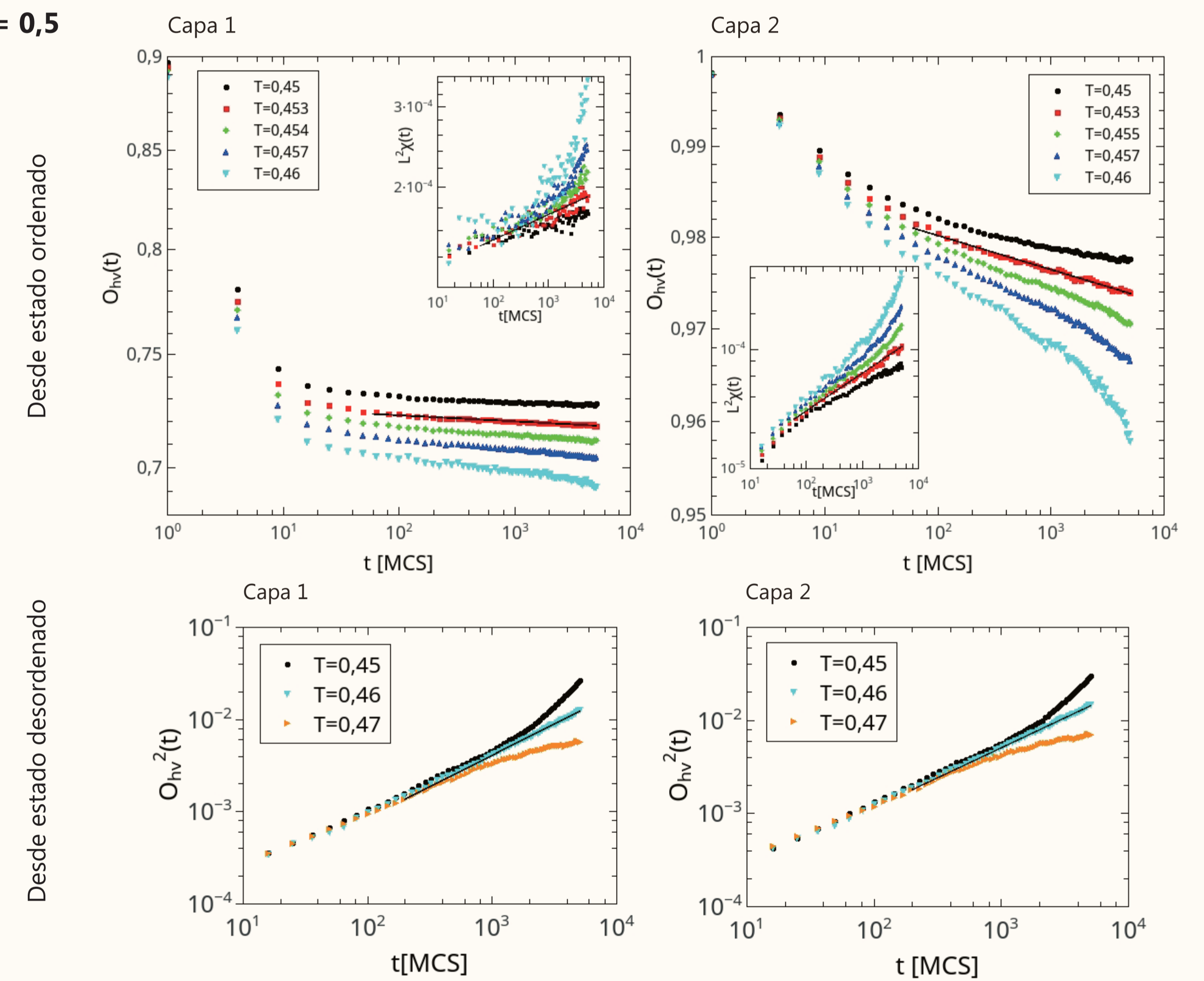


Al aumentar el acoplamiento ($J_3 = 1,25$) se observa una fase intermedia de ancho $h=1$ en $T = 0,5$. Se presume que existen dos transiciones una h_2-h_1 y otra h_1-TL . En este caso fue necesario incrementar el tiempo de simulación hasta 10^7 PMC para asegurar que se había alcanzado la configuración de equilibrio.

Evolución de $O_{hv}(t)$ y $\chi(t)$ desde el estado ordenado ($T = 0$) y $O_{hv}^2(t)$ desde el estado desordenado ($T = \infty$).

Se acotó el intervalo de T buscando el comportamiento de O_{hv} como ley de potencia. La temperatura de transición se distinguió con la mejor ley de potencia de la susceptibilidad.

Caso $J_3 = 0,5$



J_3	T de transición desde estado ordenado	T de transición desde estado desordenado
0,5	0,453 (3)	0,46 (1)
-0,5	0,455 (5)	0,46 (1)
1,25	0,49(1)	(*)

Para ambas capas las temperaturas a las que se observaron las leyes de potencia fueron coincidentes. Las estimaciones de las temperaturas de transición para las evoluciones desde ambos estados son muy próximas, prácticamente coinciden dentro del error, con lo cual se sugiere que la transición h-TL sería continua.

Se repitió el procedimiento para los otros valores de J_3 (no mostrados por motivos de espacio). En el caso de $J_3 = -0,5$ nuevamente se observa una coincidencia en las temperaturas de transición, lo que indicaría que se trata de una transición continua en ambas capas.

En el caso de $J_3 = 1,25$, en ambas capas, el estado ordenado indicaría una transición a la fase TL a la temperatura $T = 0,49$, mientras que para el estado desordenado (*) estaría indicando dos transiciones, una hacia la fase TL para T mayores próximas a 0,50 y otra del tipo $h_2 \rightarrow h_1$ a $T < 0,30$, las cuales se encuentran bajo estudio.

CONCLUSIONES

– Los resultados muestran el acoplamiento de las capas de acuerdo al signo de J_3 , ferro o antiferromagnético.
– Las temperaturas de transición para los valores de J_3 estudiados resultaron coincidentes para ambas capas, e intermedias respecto a las correspondientes temperaturas de las monocapas a los valores de J_1 ($T = 0,395(1)$) y J_2 ($T = 0,572(1)$) considerados.

– El caso $J_3 = 1,25$ podría presentar una transición de ancho $h_2 \rightarrow h_1$ para una temperatura $T < 0,3$. Además se observa una segunda transición para temperaturas $T \sim 0,5$. Estas transiciones están bajo estudio.

BIBLIOGRAFÍA

– J. M. D. Coey, "Magnetism and Magnetic Materials", Cambridge University Press (2009).
– P. Ewald, Ana. Phys. 369 (3), 253 (1921).

– M. A. Bab, C. M. Horowitz, M. L. Rubio Puzzo, y G. P. Saracco, Phys. Rev. E, 94,42104 (2016);
– C. M. Horowitz, M. A. Bab, M. Mazzini, M. L. Rubio Puzzo, y G. P. Saracco, Phys. Rev. E, 92, 042127 (2015).