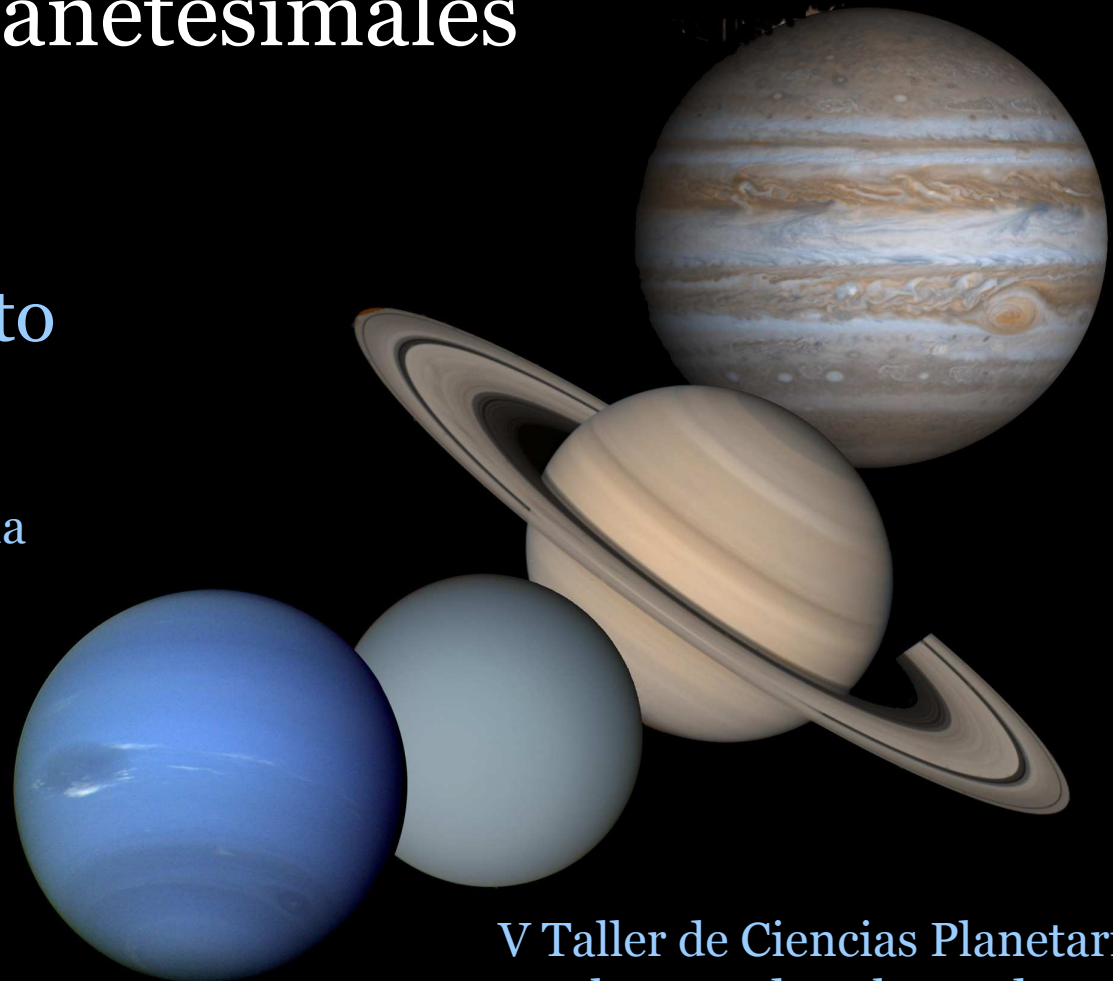


Análisis de la dependencia de la formación de los planetas gigantes con el tamaño de los planetesimales

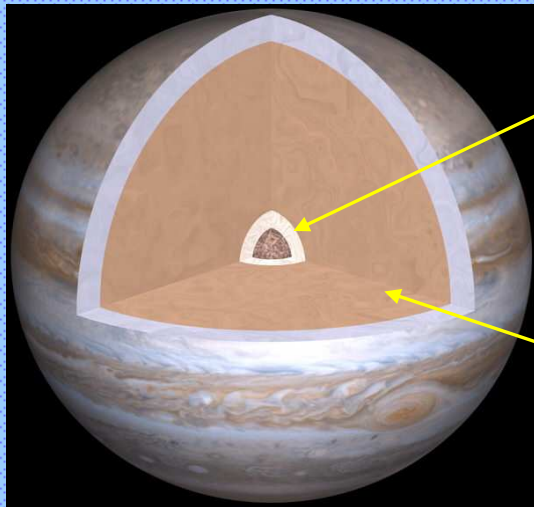
Andrea Fortier
Omar Benvenuto
Adrián Brunini

IALP-FCAGLP, Argentina



V Taller de Ciencias Planetarias
La Plata, 25 de Febrero de 2010

Introducción

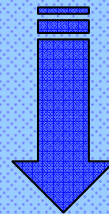


núcleo sólido

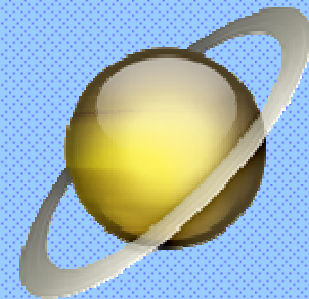
envoltura gaseosa

Una teoría de formación de planetas gigantes tiene que poder explicar las dos componentes bien diferenciadas que presenta su estructura:

- núcleo sólido
- envoltura gaseosa.



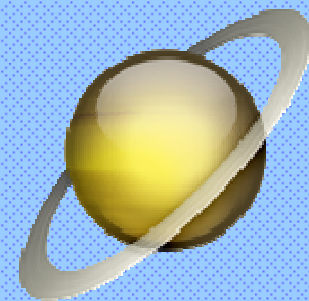
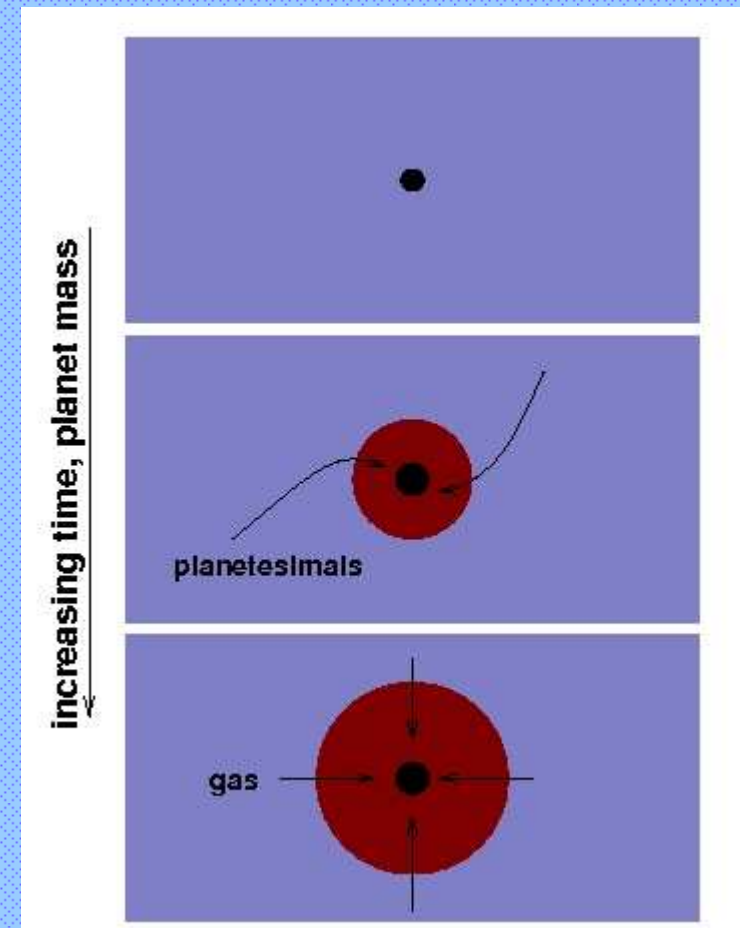
**Modelo de
inestabilidad
nucleada**



El modelo de inestabilidad nucleada

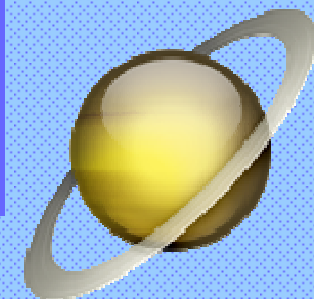
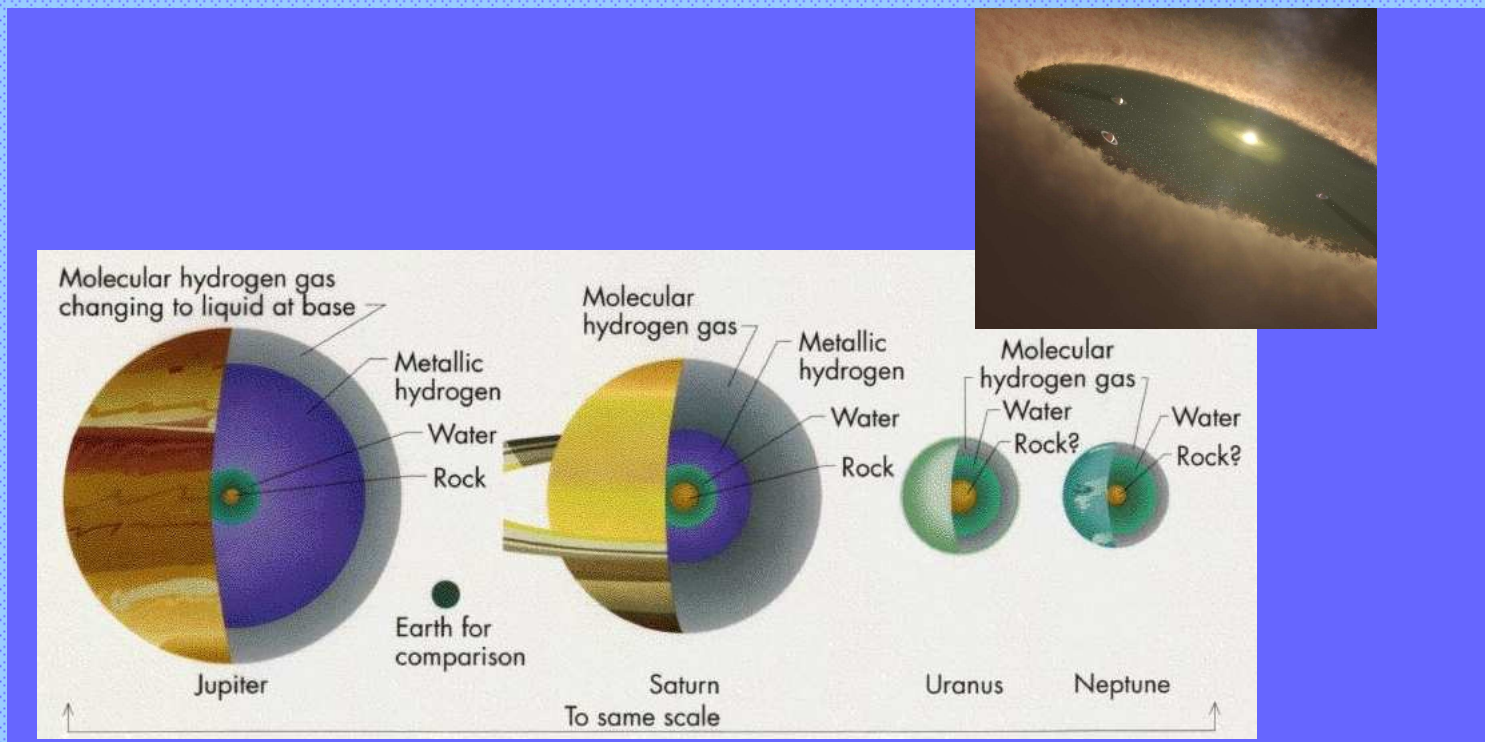
De acuerdo con este modelo la formación ocurre en dos etapas:

1. Por acreción de planetesimales se forma primero el núcleo sólido (en un modo completamente análogo a como lo hacen los planetas terrestres).
2. Cuando el núcleo alcanza algunas veces la masa de la Tierra ($\sim 10 M_{\oplus}$) es capaz de ligar gravitatoriamente parte del gas que lo rodea, dando origen a la extendida envoltura que caracteriza a estos planetas.



Condiciones para considerar satisfactorio un resultado:

- La formación de los planetas gigantes debe completarse antes que se disipe el disco protoplanetario. Observacionalmente se establece una cota superior para la vida media de los discos protoplanetarios: $\tau < 10^7$ años.
- La masa final del núcleo de cada uno de los planetas gigantes debe estar en acuerdo con las estimaciones aceptadas para los núcleos actuales.

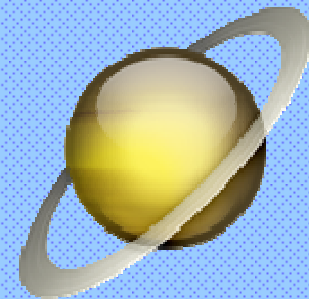


Nuestro modelo para el cálculo de la formación de planetas gigantes:

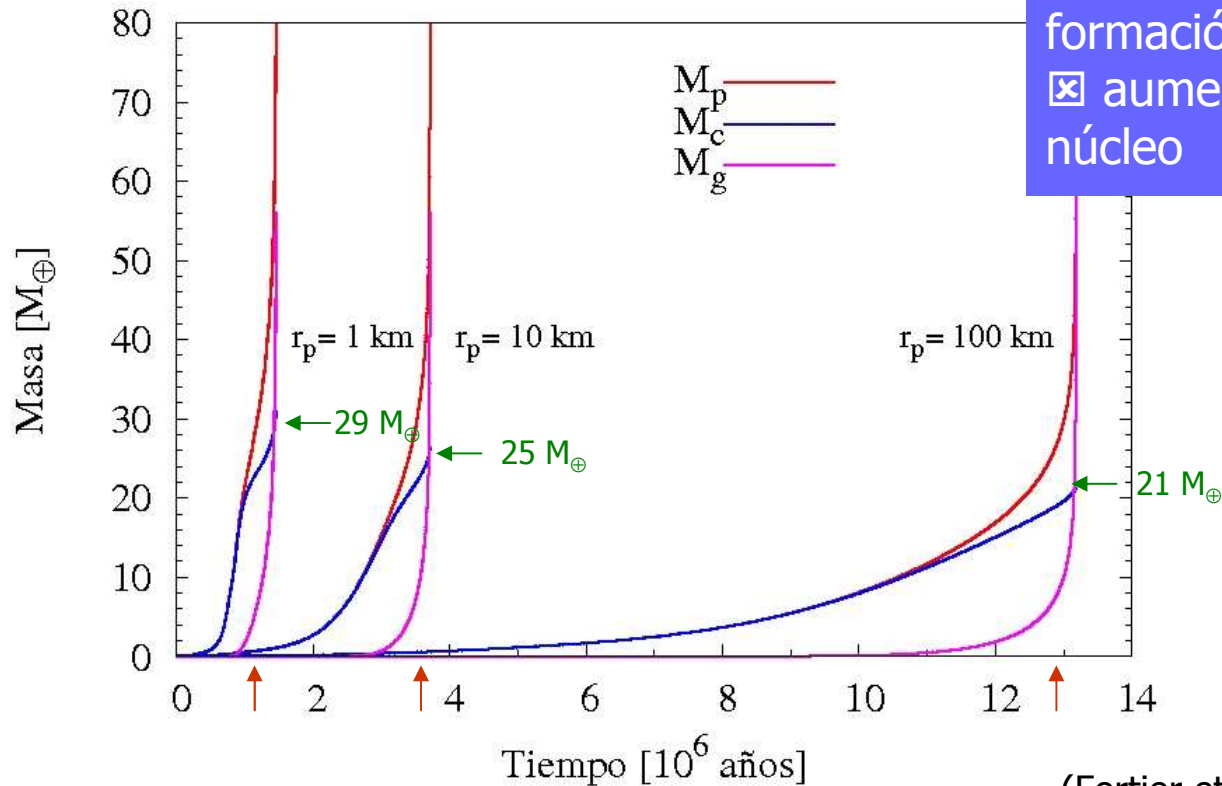
(Benvenuto & Brunini 2005, Fortier et al. 2007, 2009)

- ✓ resolución numérica de las ecuaciones diferenciales de estructura estelar (→ cálculo autoconsistente del crecimiento y de la estructura de la envoltura de gas del planeta)
- ✓ tasa de acreción de sólidos dependiente del tiempo correspondiente al régimen de crecimiento *oligárquico* (→ acoplada a las ecuaciones de estructura)
- ✓ interacción entre los planetesimales ingresantes y la envoltura (→ intercambio energético)
- ✓ **distribución de tamaños para los planetesimales**
- ✓ **condiciones iniciales compatibles con el modelo de Niza**

- ✗ no rotación, no campos magnéticos
- ✗ modelo unidimensional en órbita circular de radio constante
- ✗ formación aislada, sin evolución del disco
- ✗ núcleo inerte
- ✗ no se calcula la finalización de la acreción



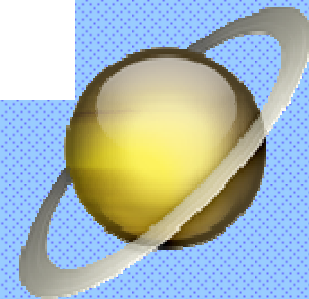
Formación de Júpiter



Reducir el radio de los planetesimales implica:
 acortar los tiempos de formación
 aumentar la masa del núcleo

(Fortier et al 2009)

$\Sigma_0 = 15 \text{ g cm}^{-2}$ (~ 5 Nebulosas de Masa Mínima Solar)



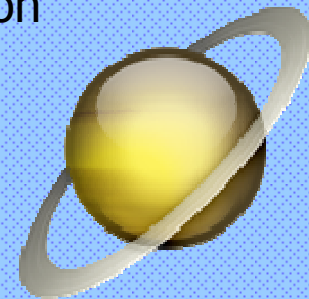
- Kokubo & Ida (2000) encontraron que la distribución de masas que sigue la población de planetesimales corresponde a una ley de potencias.

$$\int n m d m \propto m^{\alpha+2} \quad \alpha \in (-3, -2)$$

Consideramos que la población de planetesimales está compuesta por cuerpos de entre 0,03 km y 100 km de radio (discretizado en 9 especies equiespaciadas en el logaritmo).

Dependiendo del valor de α podemos distinguir tres casos:

- $\alpha > -2$ los planetesimales más grandes de la distribución dominan la masa de la población
- $\alpha = -2$ todas las especies de la población de planetesimales son igualmente abundantes
- $\alpha < -2$ los planetesimales más pequeños de la distribución dominan la masa de la población



- **Modelo de Niza** (Tsiganis et al. 2005): en un comienzo, los planetas exteriores formaban un sistema más compacto. Culminada su formación, migraron hasta sus posiciones actuales (Júpiter hacia el interior y los otros tres en sentido contrario). En este proceso, Júpiter y Saturno cruzaron su resonancia de movimientos medios 1:2.

Semiejes: $a_J = 5,5$ UA

$a_S = 8,3$ UA

$a_U = 14$ UA

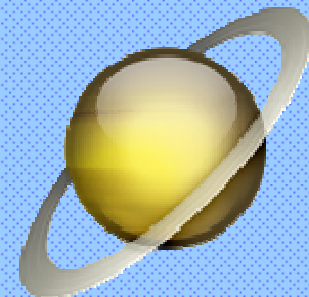
$a_N = 11$ UA

} En el 50% de sus simulaciones, Tsiganis et al.(2005) encontraron que Urano y Neptuno intercambian lugares durante su migración hacia el exterior.

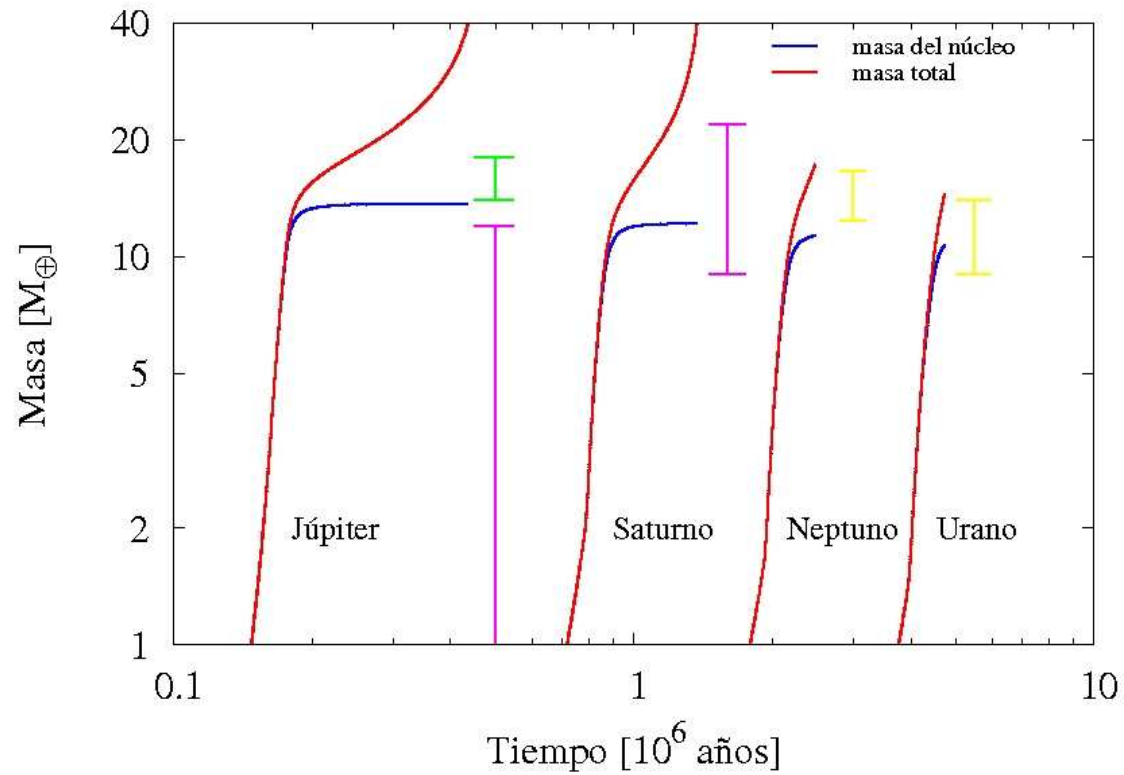
- Desch (2007) calculó un perfil de densidad nebular compatible con el modelo de Niza y obtuvo

$$\Sigma = \Sigma_0 a^{-p} \quad \text{con } p = 2,168$$

Consideraremos que $\Sigma_0 = 10 \text{ g cm}^{-2}$ en $a_J = 5,5$ UA.

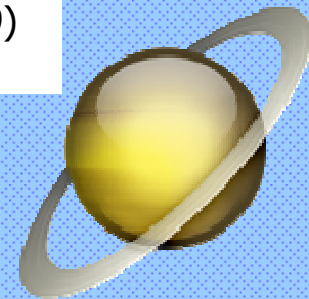


Formación de los cuatro planetas gigantes en menos de 10^7 años

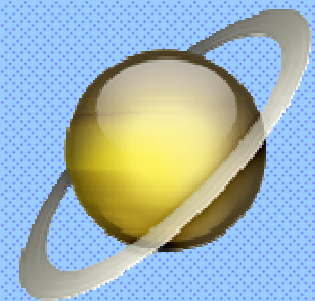


$$\alpha = -2,5$$

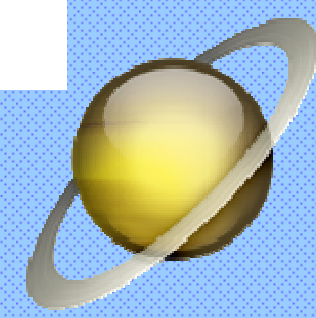
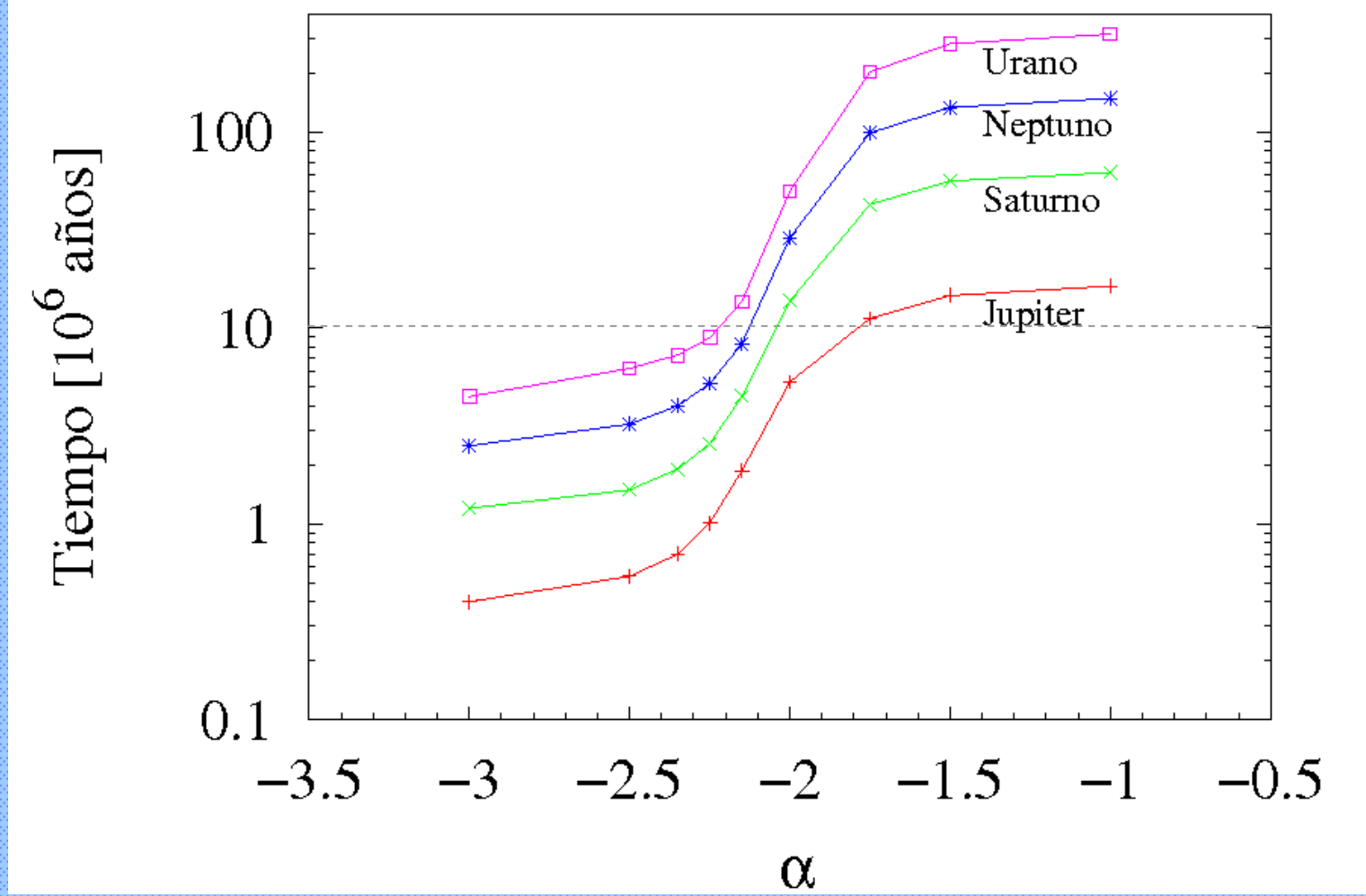
(Benvenuto et al. 2009)



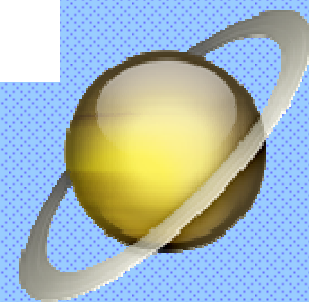
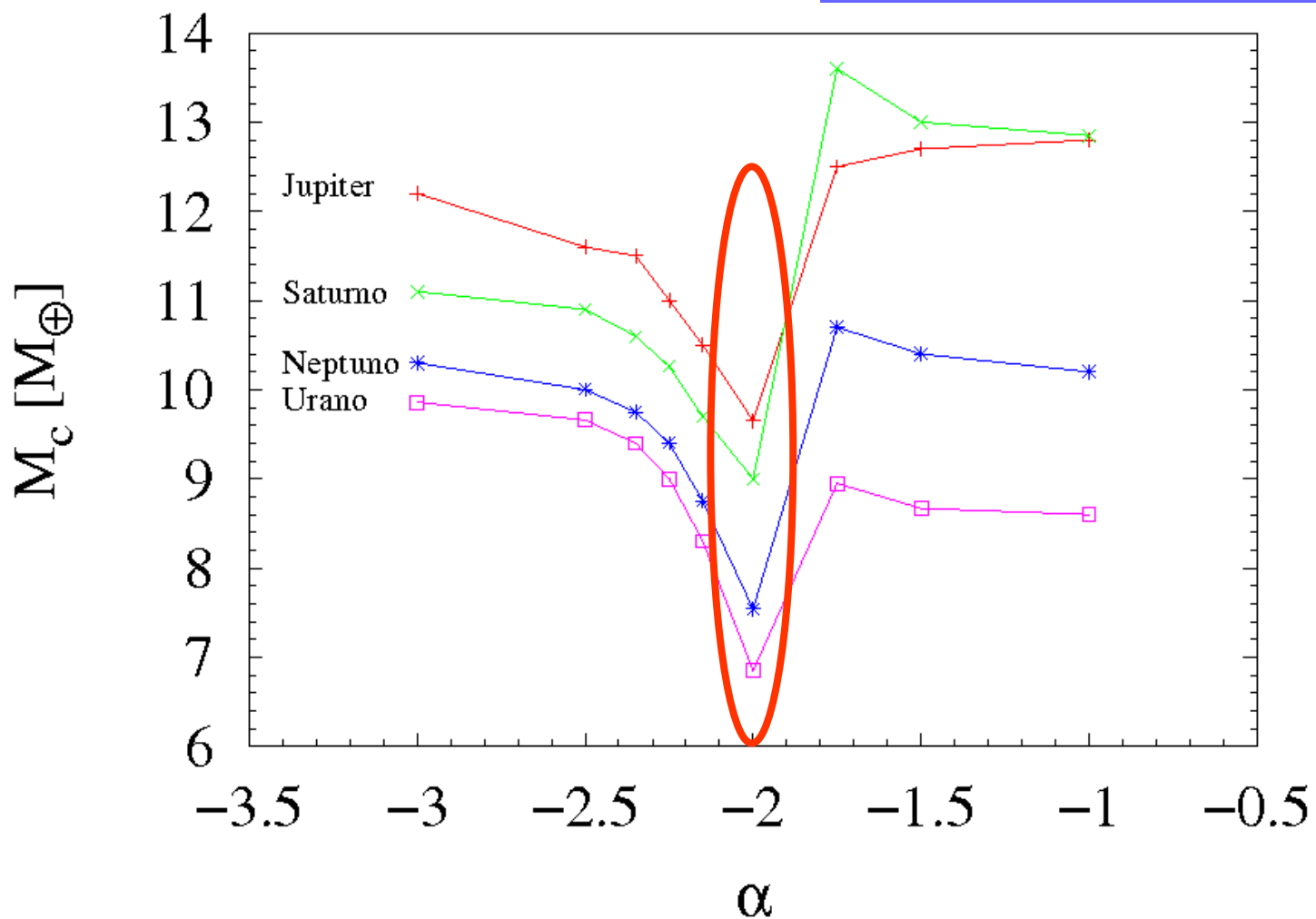
RESULTADOS



Tiempo de formación en función de α

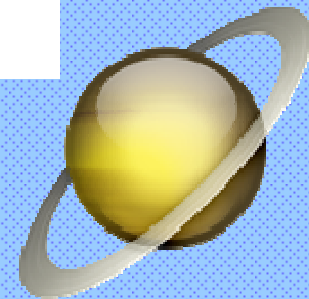
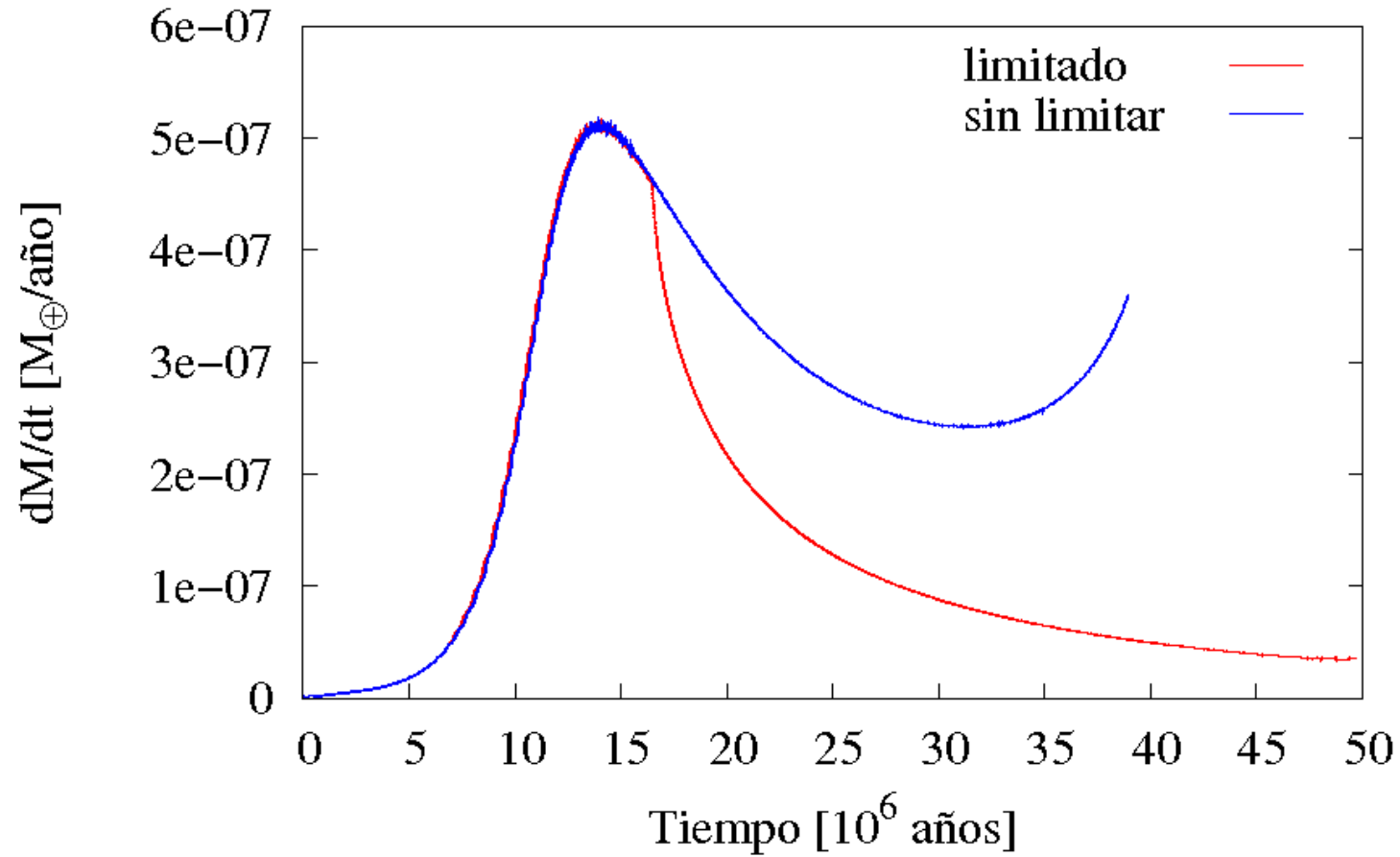


Masa del núcleo en función de α

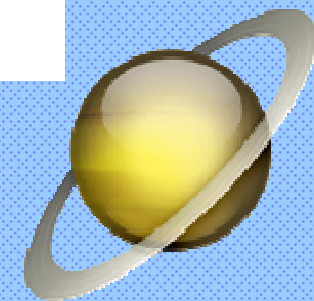
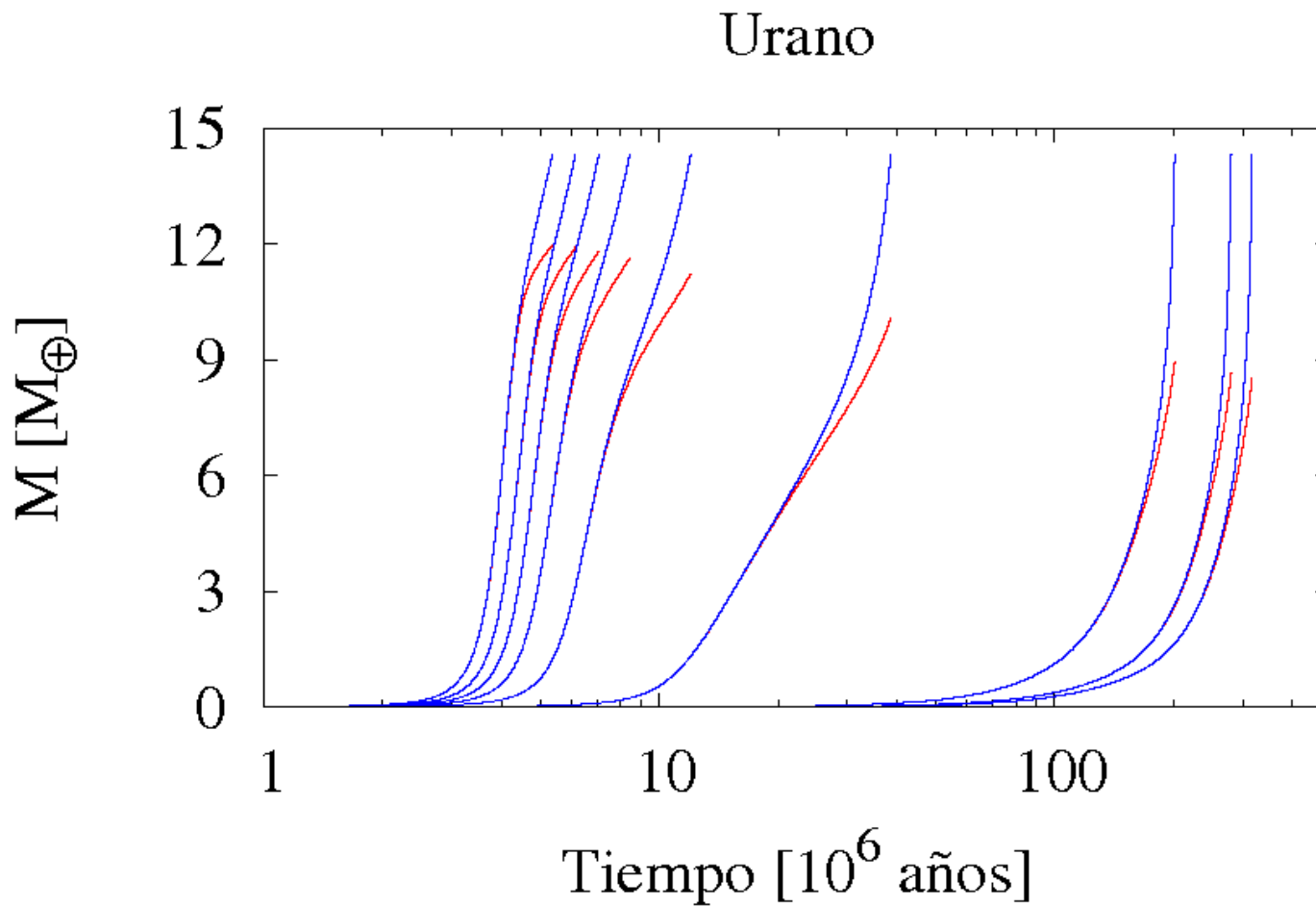


Comparación tasa de acreción de sólidos ($\alpha=-2$)

Urano

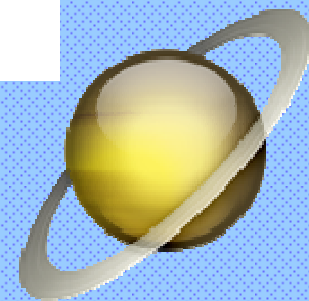
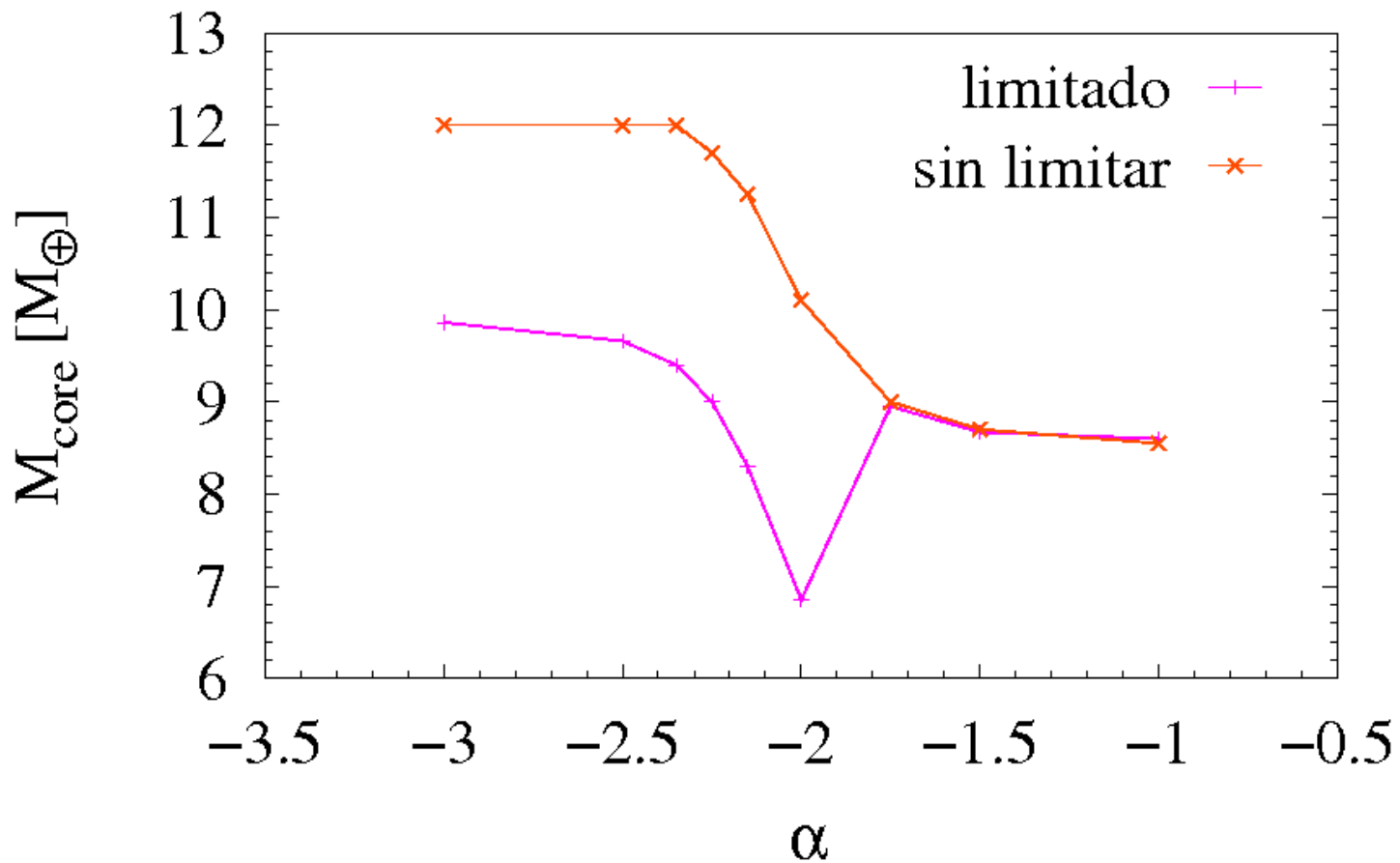


Evolución de la masa de Urano sin limitar la tasa de acreción de sólidos



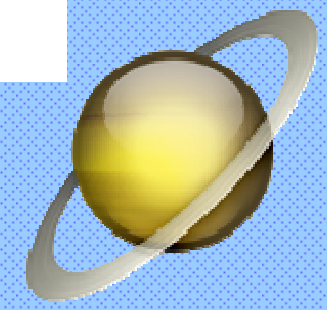
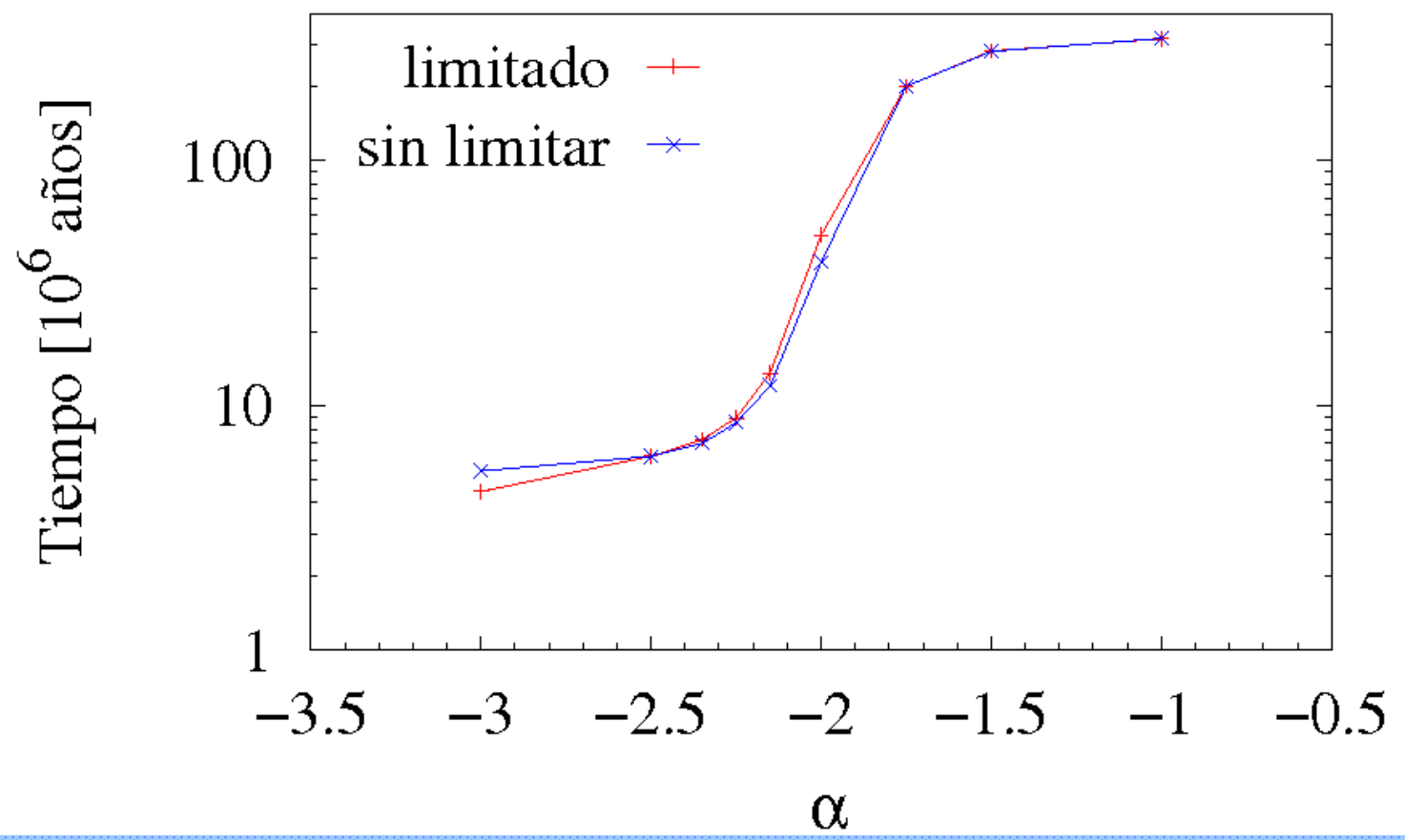
Masa del núcleo en función de α

Urano

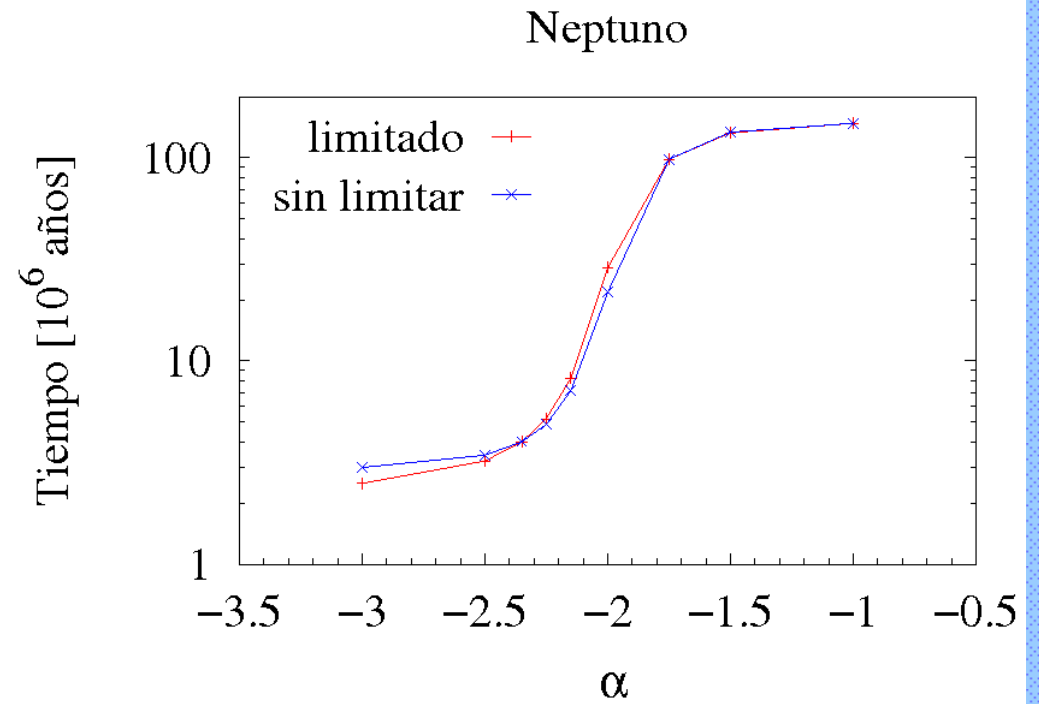


Tiempo de formación en función de α

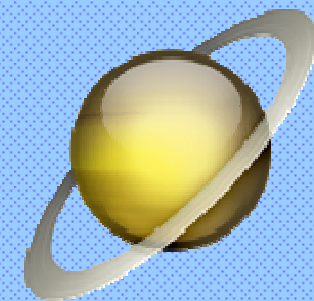
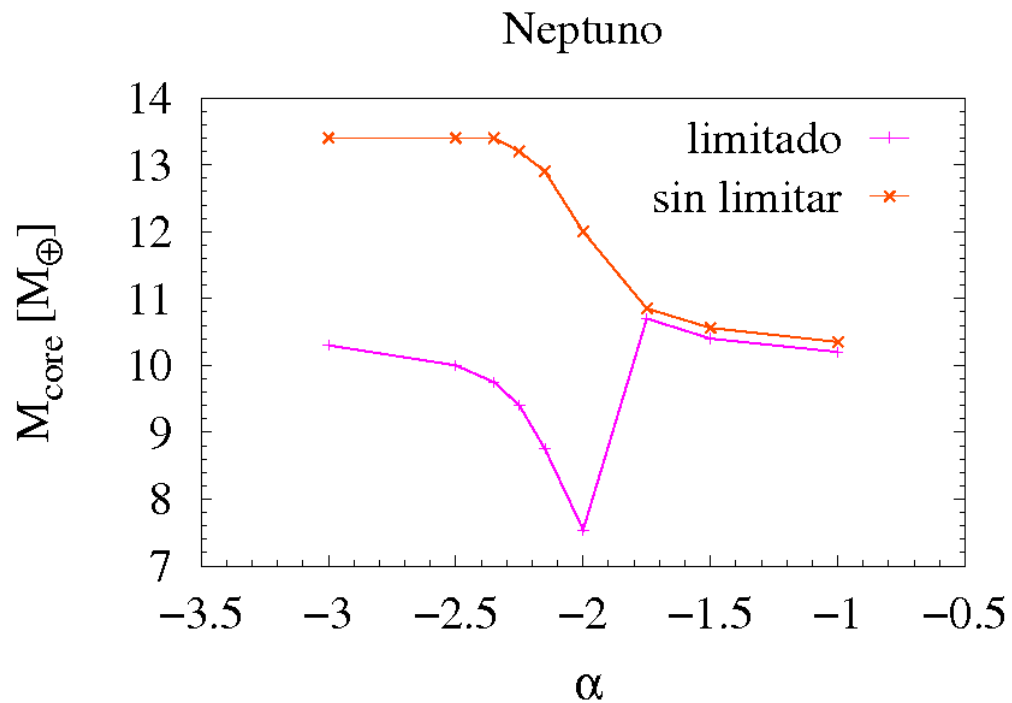
Urano



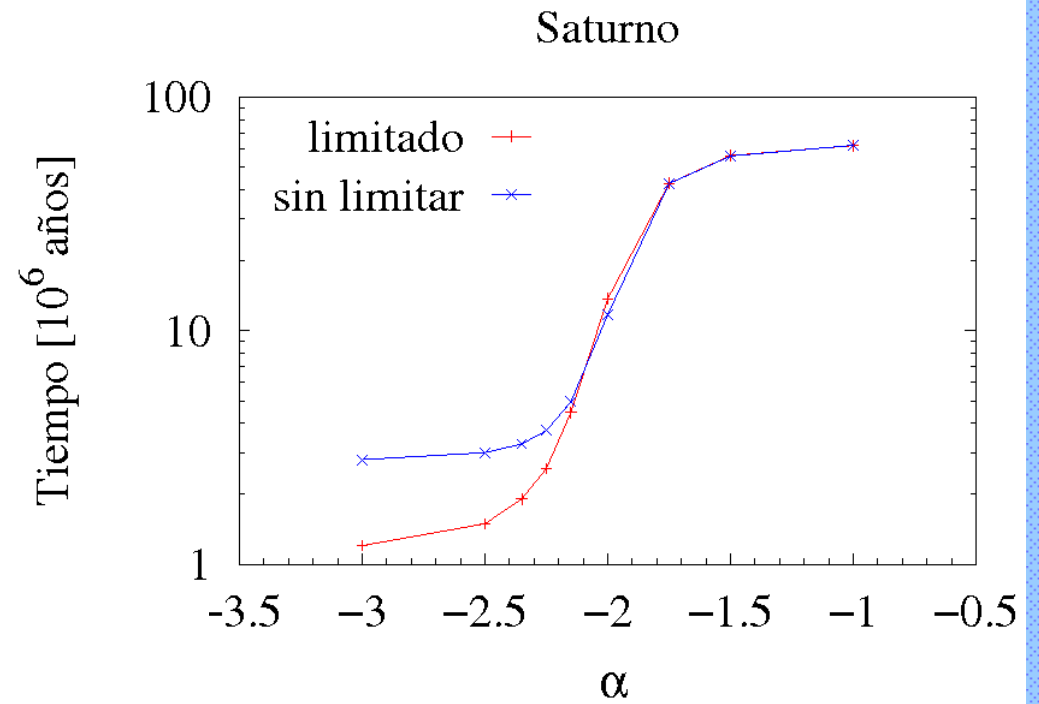
Tiempo de formación en función de α



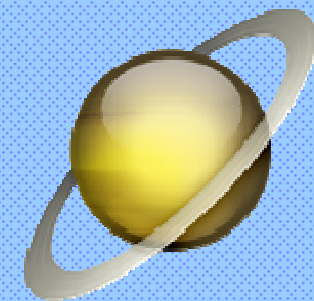
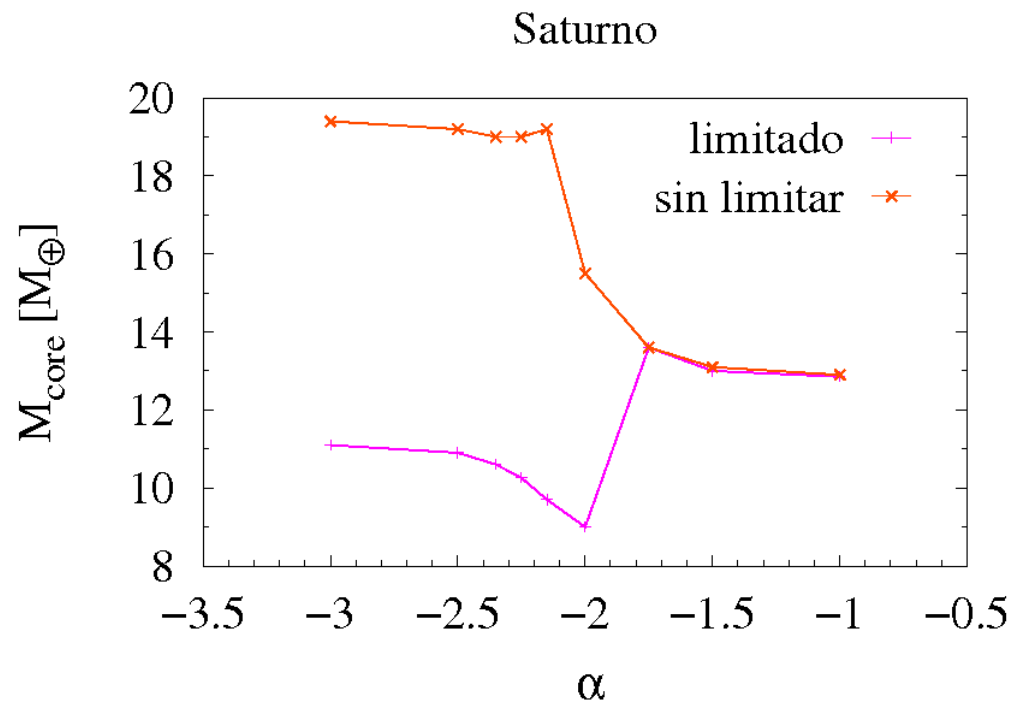
Masa del núcleo en función de α



Tiempo de formación en función de α

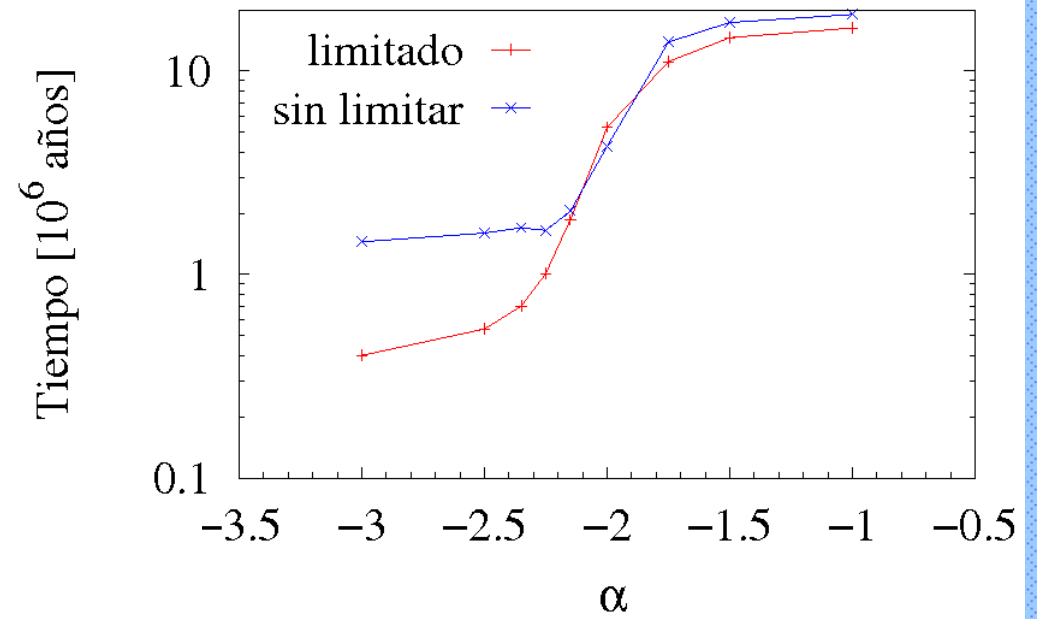


Masa de cruce en función de α



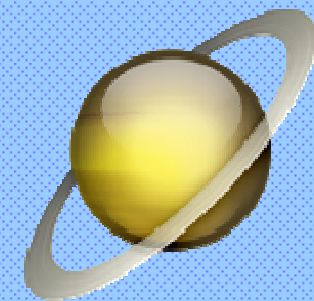
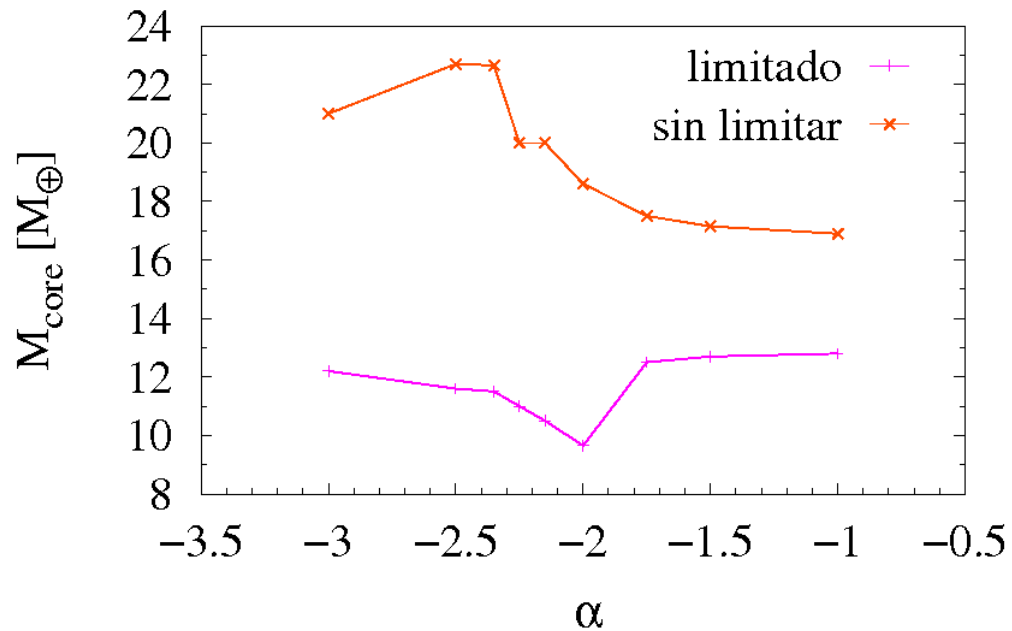
Tiempo de formación en función de α

Jupiter



Masa de cruce en función de α

Jupiter

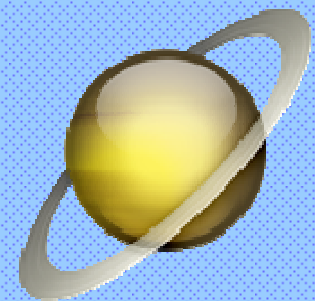


Para valores de $\alpha < -2$ y para cada uno de los planetas consideramos incrementar el radio mínimo de los planetesimales acretados:

$$R_{\min} = 100 \text{ m} \text{ y } R_{\min} = 316 \text{ m}.$$

Se encuentra que el tiempo de formación aumenta en un factor entre 1.3 y 2 cuando se comparan dos simulaciones donde la única diferencia entre ellas es el radio mínimo de los planetesimales acretados.

Sin embargo, al comparar las masas de los núcleos para estas mismas simulaciones se encuentra que permanecen prácticamente inalteradas.



Conclusiones

✓ el modelo de inestabilidad nucleada, aún adoptando el régimen oligárquico para la acreción de sólidos, propone un escenario factible para la formación de los planetas gigantes del Sistema Solar, en acuerdo con las restricciones actuales para la masa del núcleo y el tiempo de formación

↳ aceptando el modelo de Niza para la arquitectura original del Sistema Solar

↳ considerando que la distribución de tamaños de los planetesimales originales sigue una ley de potencias donde los más pequeños son los más abundantes (la mayor parte de la masa de sólidos acretada está en planetesimales de radio menor a 1 km)

