

UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO

CAMPUS GUANAJUATO

DIVISIÓN DE CIENCIAS NATURALES Y EXACTAS



UN NUEVO DIAGRAMA DE DIAGNÓSTICO PARA  
LA CLASIFICACIÓN DE EXOPLANETAS

Tesis presentada al  
POSGRADO EN CIENCIAS (ASTROFÍSICA)

como requisito para la obtención del grado de  
MAESTRÍA EN CIENCIAS (ASTROFÍSICA)

por  
LAUREN MELISSA FLOR TORRES

asesorado por  
DR. ROGER COZIOL

Guanajuato, Gto. - Agosto 2015



A José, Silvia, Luisa, Daniela,  
el resto de mi familia y amigos cercanos.

*“Defiende tu derecho a pensar, porque incluso  
pensar de manera errónea es mejor que no pensar.”  
- Hipatia de Alejandría*





---

# Agradecimientos

---

## Institucionales

- Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por haberme otorgado la beca con la que pude mantenerme durante el periodo de realización de mis estudios de maestría.
- Agradezco a la Universidad de Guanajuato, en especial, al Departamento de Astronomía, a sus administrativos, investigadores y profesores, así como al Posgrado en Ciencias (Astrofísica), y a su coordinador por brindarme su apoyo, y permitir realizar mi preparación profesional.
- A la Dirección del Campus Guanajuato, la División de Ciencias Naturales y Exactas, y a la Dirección de Apoyo a la Investigación y al Posgrado (DAIP) de la Universidad de Guanajuato, por el apoyo económico brindado en los viajes realizados para la participación a congresos, tanto nacionales como internacionales.



## Personales

- En primer lugar, quiero extender un inmenso agradecimiento a mi director de tesis, Dr. Roger Coziol, quien ha sido mi guía durante esta etapa. Dr. Roger Coziol agradezco inmensamente por el apoyo incondicional que me ha ofrecido, además de los consejos que me ha brindado tanto en la parte académica como profesional. Siempre recordaré que gracias a usted conocí Italia!!
- A mis sinodales, Dres. Juan Pablo Torres Papaqui, Klaus Peter Schroeder, Erick Nagel Vega y Josep Maria Masqué Saumell, por aceptar ser los jurados en mi titulación, tomarse el tiempo de leer mi tesis y por presentar comentarios de esta.
- Al Dr. Juan Pablo Torres Papaqui por el arduo trabajo que ha realizado en el Posgrado. Además de la amistad tan bonita, que junto a su esposa e hijo, me han brindado.
- Agradezco a mis compañeros del Departamento de Astronomía, por llevar adelante el posgrado dejando a un lado las diferencias que tenemos.
- Agradezco al motor de mi vida, mis padres José Flor y Silvia Torres, por el apoyo, el amor, la unión, la fortaleza, que sin importar la distancia, siempre me han brindado. De igual forma agradezco a mis hermanas, Luisa Flor y Daniela Flor, por ser mis amigas y cómplices eternas. Familia gracias por tenerme tanta paciencia y animarme en los momentos que más lo necesitaba, y gracias por no dejar que la distancia nos separará.
- Agradezco al resto de mi familia colombiana, abuelas, abuelo, tíos, tías, primos, primas, desde cualquier parte del mundo, por cada palabra brindada en el momento justo.
- A mi Gabriela preciosa, gracias por siempre alegrarme con tu sonrisa y con cada carta que espero ansiosa recibir cuando estoy llegando a tierras colombianas. Aprovecho para dar una bienvenida a mi primito lindo Nicolás Torres Berrio, te amo.
- De igual forma, agradezco a mis amigos colombianos, quienes a pesar de la distancia siempre estuvieron ahí para mí.
- Agradezco a mis muchachones, Oscar, Fernando y Jorge, los FANTÁSTICOS!. Oscar, gracias por la confianza que me has ofrecido, por ser el compañero de maestría chido, y por ayudarme con cada duda académica que tuve (mejor dicho, gracias por aguantarme). Jorge gracias por tu apoyo, y por no olvidarte de estos locos astronomós en tierras Guanajuatense. Fer, gracias por cada consejo, regaño, enojo y por ese apoyo incondicional que siempre me has brindado. Gracias por su sincera e inigualable amistad chicos, por los momentos inolvidables que pasamos y que espero que sigamos pasando juntos.





## Resumen

Usando un nuevo diagrama de diagnóstico, utilizando el Potencial Gravitacional Bariónico (PGB) como parámetro físico, clasificamos una muestra de 340 de exoplanetas en términos de sus posibles estructuras físicas. Se pudo demostrar que la mayoría de los exoplanetas tienen estructuras similares a los planetas del Sistema Solar. También se mostró que el PGB mismo puede servir de modelo físico para explicar las diferentes relaciones Masa-Radio (MR) de exoplanetas con diferentes estructuras físicas. El beneficio de este nuevo modelo es que explica el comportamiento de cualquier tipo de exoplanetas, tipo Tierra y Super-Tierra, tipo Urano y Neptuno, y tipo Saturno. Incluso nuestro modelo explica el comportamiento de los exoplanetas que sufren inflación de su radio, debido a la irradiación de su estrella, los Jupiter Calientes “Hot-Jupiters”.

Usando el PGB definimos un nuevo límite en masa y radio para exoplanetas que distingue exoplanetas autogravitante (SG) de exoplanetas no autogravitantes (No-SG). Asimismo, mostramos que estos dos tipos de exoplanetas siguen diferentes relaciones MR. Los exoplanetas No-SG tienen un radio que aumenta con la masa, mientras que en los exoplanetas SG el radio se queda constante a medida que la masa aumenta. Revisando la literatura, se encontró que su relación MR es característica de un cierto tipo de composición, lo que sugiere que estos cuerpos están formados de un núcleo sólido y de una envoltura masiva hecha de hidrógeno líquido metálico (HLM). Por lo tanto, nuestro análisis permitió descubrir un nuevo tipo de exoplanetas.

Además, comparamos en el diagrama de diagnóstico, las enanas marrón (BDs) con los exoplanetas, usando una muestra de 17 BDs confirmadas. Encontramos una relación MR distinta a la de los exoplanetas, en donde el radio de las BDs disminuye con la masa. Por otro lado, 11 exoplanetas identificados en el diagrama de diagnóstico como candidatas BDs, mostraron la misma relación MR a los BDs. A partir de estos resultados concluimos que los exoplanetas y las BDs tienen diferentes estructuras físicas: las BDs están completamente hechas de gas, mientras los exoplanetas están generalmente compuestos de un núcleo sólido, el cual es cubierto de una envoltura de gas. Esto reafirmó la idea que las BDs y los exoplanetas se forman de manera diferente. En este caso, las BDs podrían ser formadas por el colapso gravitacional de una nube molecular, mientras los exoplanetas se podrían formar mediante la acreción de materia en un disco protoplanetario.

Así que, en base al análisis hecho en esta tesis, concluimos que el diagrama de diagnóstico y el modelo de la relación MR, ambos basados en el PGB, son dos herramientas importantes y útiles, que permiten mejorar de manera significativa nuestro conocimiento de la estructuras y origen de los exoplanetas.

## Abstract

Using a new diagnostic diagram, based on the Gravitational Barionic Potential (GBP), we classified a sample of 340 exoplanets in terms of their potential physical structures. We then demonstrated that the majority of exoplanets are similar to the planets of the solar system. We also showed that the GBP itself can serve as a physical model to explain the mass-radius (MR) relation of exoplanets with different physical structures. The benefit of this new model is that it explains the behavior of any types of exoplanets, Earth and Super-Earth types, Uranus-Neptune type, and Saturn type. Our model even offers a simple and complete explanation of the hot-Jupiter type, fully consistent with the standard irradiation model.

Using the PGB, we also defined a new limit of mass and radius to distinguish self-gravitating (SG) exoplanets from standard (non self-gravitating) massive gas rich exoplanets (No-SG). We showed that these two types of exoplanets follow different MR relations: the No-SG exoplanets have a radius that increases with the mass, while the SG exoplanet's radius remains constant as the mass increases. Reviewing the literature, we found that this particular behavior for the SG exoplanets suggests they are formed by a solid core enrolled in a massive envelope made of liquid metallic hydrogen (LMH). This, therefore, is a new type of planet.

In addition, using the diagnostic diagram we compared the brown dwarfs (BDs) with the exoplanets, using a sample of 17 confirmed BDs. Doing so allowed us to identify 11 new BD candidates. We also verified that the BDs follow distinct MR relations, the radius decreasing as the mass increases, and found that the 11 BD candidates do exactly the same. From these results we conclude that exoplanets and BDs have different physical structures: the BDs are entirely made of gas, while the exoplanet are usually composed of solid core enrolled in an envelop of gas. This reinforce the idea that the BDs and exoplanets formed in different ways: the BDs could formed by the gravitational collapse of a molecular cloud, while exoplanets formed through core-accretion in a protoplanetary disk.

Henceforth, based on the analysis made in this thesis, we conclude that the diagnostic diagram and the MR model based on the PGBs, are important and useful new tools for the study of exoplanets, that allow us to improve significantly our knowledge about their structures and origin.

