

COLORES Y ALBEDOS DE TNOS  
Y CENTAUROS

## COLORES:

Ref. Peixinho et al. 2012 (A&A) y Peixinho et al. (2015) (A&A)

Desde las primeras observaciones se ha debatido sobre los colores superficiales de los TNOs y Centauros. Los análisis más detallados encuentran que los TNOs exhiben una distribución de colores amplia y continua de neutros hasta muy rojos y los Centauros una distribución bimodal.

La relevancia de esto es la cuestión del origen de esta diferencia.

- Los TNOs y los Centauros tienen diferente composición, y entonces se formaron en diferentes partes de la Nebulosa.
- 
- Los TNOs y Centauros tienen el mismo origen, pero evolucionaron de manera diferente y los procesos que sufrieron los alteraron de manera diferente.

Se han propuesto una diversidad de modelos para explicar tanto la bimodalidad de Centauros como los rangos extremos de colores.

Estos incluyen: enrojecimiento por irradiación de los hielos, “azulamiento” por colisiones (resurfacing), actividad cometaria, etc.

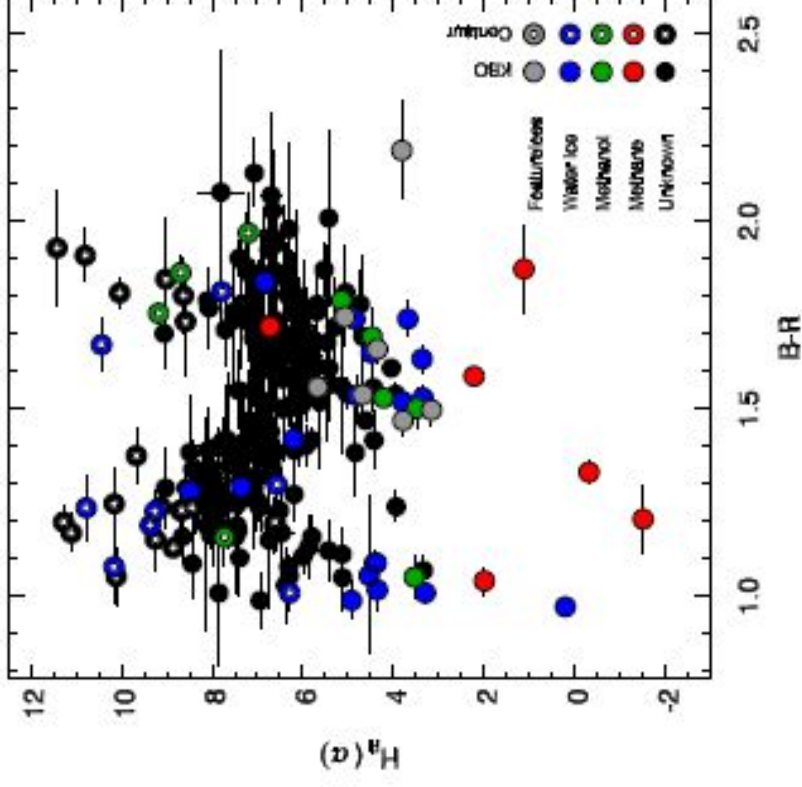
Pero nada hasta ahora puede explicar todo.

---

Peixinho et al. 2012 analizan el tema de la bimodalidad de Centauros y TNOs pequeños. Presentan datos de 7 TNOs débiles y 3 Centauros junto con 253 colores  $B - R$  y magnitudes aparentes y absolutas junto con algunas características espectrales (de 48 de estos objetos).

Los objetos nuevos se observaron con el telescopio Subaru de 8.2 mts y el 2.2 mts de Hawai. Grafican la magnitud absoluta  $R$  que es una medida del tamaño del objeto vs el color  $B - R$

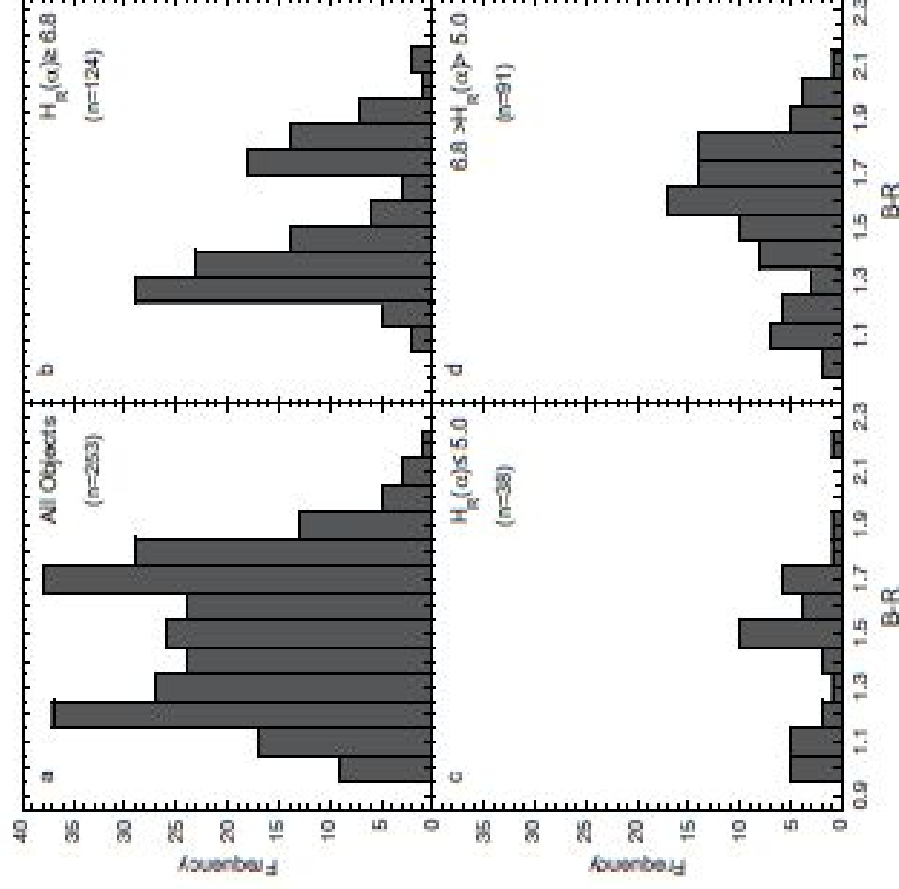
La nube de puntos forma una “N”.  
 Los objetos más pequeños muestran una distribución (B-R) bimodal, mayormente Centauros, pero también TNOs pequeños. En  $H < 7$ , esta bimodalidad desaparece y se hace unimodal. Luego para los objetos más grandes aparece otra bimodalidad, pero corrida hacia el azul



**Fig. 1.**  $B - R$  vs.  $H_R(\alpha)$  plot of all 253 objects. KBOs are represented by solid circles and Centaurs by white dotted solid circles. Objects with  $H_R(\alpha) \geq 6.8$  separate into two color groups with a “gap” centered at  $B - R \sim 1.60$ . Objects with  $H_R(\alpha) < 5.0$  also show statistical evidence of a separation into two-color groups but with a “gap” centered at  $B - R \sim 1.25$ . Objects spectra with known features of water ice, methane, methanol, and featureless spectra, are coded using colors as described in the legend. There is no obvious/clear connection between  $B - R$  colors and the presence of spectral features.

La muestra completa, a pesar de los 2 picos, no muestra evidencia fuerte contra unimodalidad. Los Centauro (n=29) muestran fuerte evidencia contra unimodalidad y esto se acentúa removiendo de la muestra a los 3 Centauros grandes.

Los objetos pequeños ( $H > 6.8$ , n=124) evidencian bimodalidad, aun removiendo los Centauros y el gap está en B-R 1.6. Los objetos grandes (n=38,  $H < 5$ ) muestran bimodalidad, pero pierde significancia estadística sin la familia de Haumea. El gap está centrado en (B-R) 1.25. No hay evidencia de bimodalidad para los objetos intermedios (n=91).



## Interpretación y conclusiones:

- El gráfico de (B-R) vs  $H_R$  muestra una forma de “N”, o sea doblemente bimodal.
- La espectroscopía de 75 objetos brillantes (Barucci et al. 2011) indica que las composiciones superficiales de los TNOs y Centauros es diversa:
  - Los objetos grandes están recubiertos de hielo de metano
  - Los intermedios presentan líneas o bandas de agua
  - Los pequeños casi no tienen líneas



- Todo indica que no hay una relación visible entre la composición superficial de los objetos y los colores

- No está claro por qué no existen (o no se detectan) objetos con (B-R) 1.6 en el gap de la distribución bimodal de colores.
- Los objetos en el rango de tamaños intermedios parecen tener una distribución unimodal de colores, entonces podrían representar una fase de transición entre las dos distribuciones bimodales de los grandes y pequeños. Podrían por ej. ser demasiado grandes para ser remanentes de colisiones disruptivas o demasiado pequeños como para haber tenido actividad criovolcánica reciente... (conjetura de los autores... ojo.)

## Peixinho et al. (2015) (A&A)

En este trabajo, exploran los efectos recurrentes en el estudio de los colores visibles que pueden afectar la interpretación de los resultados:

- Cómo puede perderse o “debilitarse” una correlación por errores en los datos
- El riesgo de perder una tendencia por bajo muestreo y/o bias.
- El uso de correlaciones parciales para distinguir el efecto mutuo de dos o más parámetros físicos.
- La sensibilidad de la “reddening line” a la longitud de onda central de los filtros.

Enfocan el trabajo a estudiar correlaciones entre los colores de las superficies y los parámetros orbitales para cada familia dinámica de TNOs y Centauros.



## Clasificación dinámica

Según Lykawka & Mukai (2007):

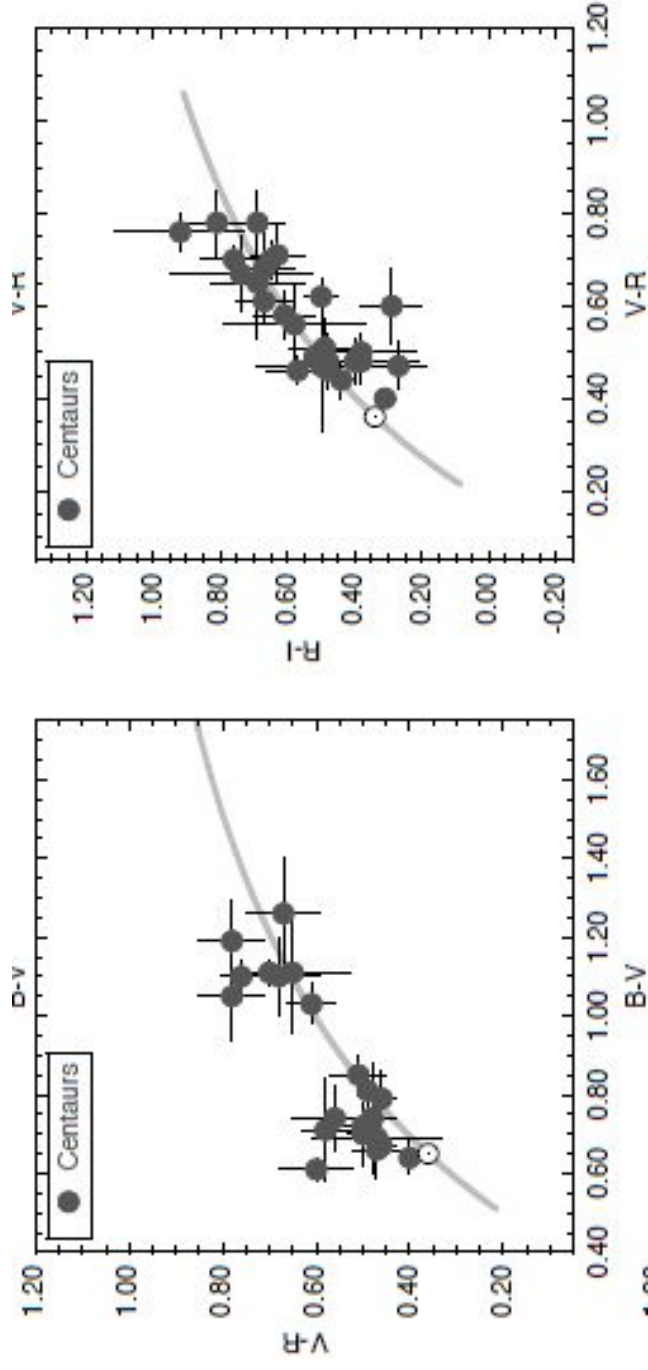
1. in 3:2 MMR with Neptune  $\rightarrow$  Plutino;
2. in other MMR with Neptune  $\rightarrow$  other resonant;
3.  $q < a_J \rightarrow$  not analysed;
4.  $q > a_J$  y  $a < a_N \rightarrow$  Centaur;
5.  $a_J < q < a_N$  y  $a \geq a_N \rightarrow$  scattered disk object (SDO);
6.  $a_N < q \leq 37\text{AU} \rightarrow$  scattered disk object (SDO);
7.  $q \geq 40 \text{ AU}$  y  $a \geq 48 \text{ AU} \rightarrow$  detached KBO (DKBO);
8.  $37 \text{ AU} \leq q \leq 40 \text{ AU} \rightarrow$  scattered or detached KBO (SDKBO);
9.  $i < 5^\circ$  y  $[q > 37 \text{ AU}$  y  $(37 \text{ AU} \leq a \leq 40 \text{ AU})]$  o  $[q \geq 38 \text{ AU}$  y  $42 \text{ AU} \leq a \leq 48 \text{ AU}] \rightarrow$  cold classical KBO (cCKBO);
10.  $i \geq 5^\circ$  y  $q \geq 37 \text{ AU}$  y  $37 \text{ AU} \leq a \leq 48 \text{ AU} \rightarrow$  hot classical KBO (hCKBO)

Recopilan colores BVRI de 366 objetos con sus errores.

Analizan posibles correlaciones entre los colores de Centauros y TNOs: (B-V, V-R, R-I, V-I, B-I, B-R y el gradiente espectral o slope parameter) y los parámetros orbitales ( $a$ ,  $Q$ ,  $i$ ,  $e$ ,  $a$ ,  $T_J$ ,  $T_N$ ,  $v$  media de impacto, excitación orbital y  $\Psi$  de Opik) usando el coeficiente de correlación de “Spearman”.

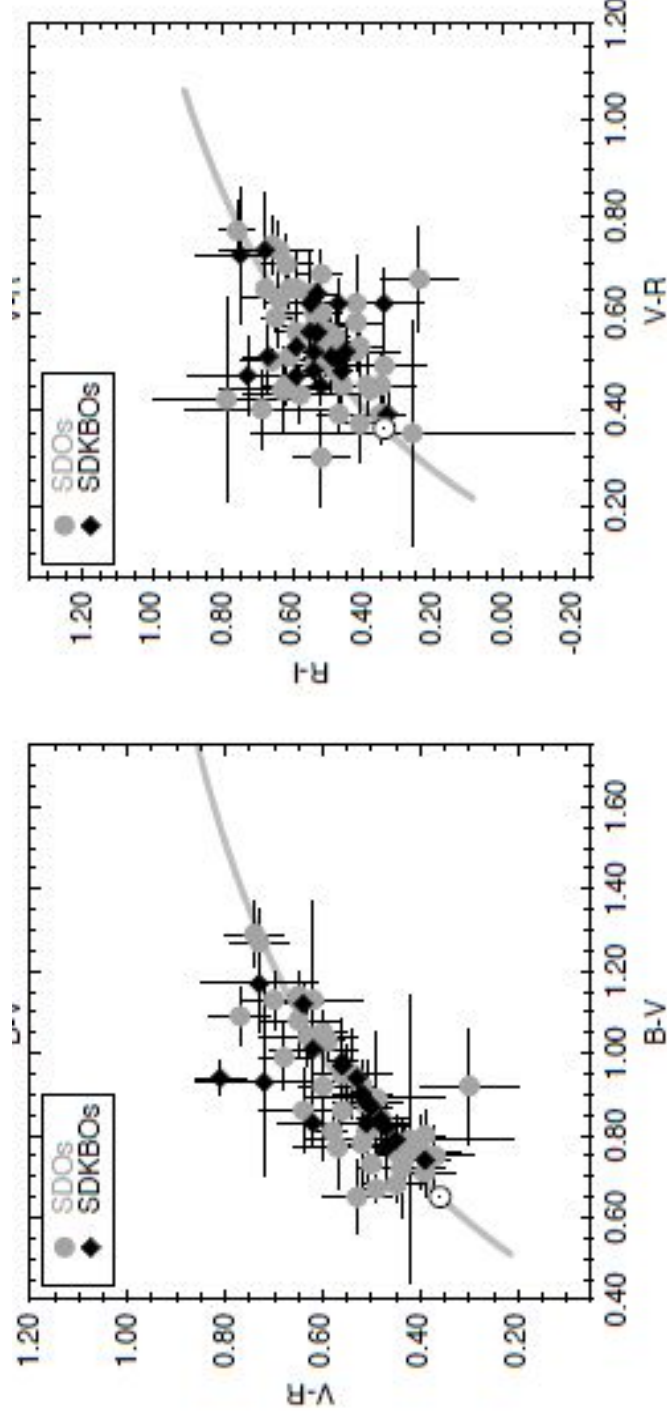
## Centauros

$n=33$ , menos uno retrógrado:  $n=32$ . Todos los índices de color se correlacionan, pero no hay correlación con  $H$  ni parámetros orbitales. Pero con los pocos datos hay un riesgo mayor al 10% de perder alguna correlación.



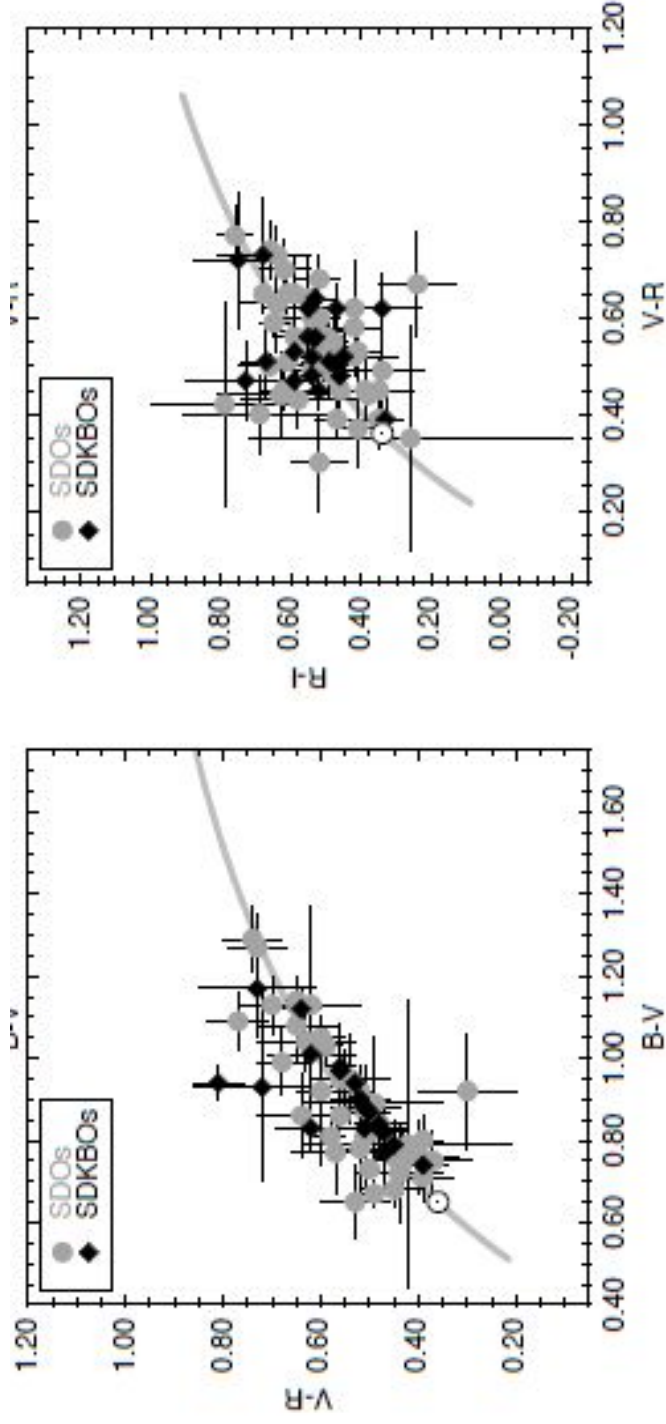
## SDOs

n=62, menos uno retrógrado y uno de Haumea family: n=60. Casi todos los índices de color se correlacionan entre sí con excepción de (B-R) vs (V-R) y (R-I). Hay correlación entre  $H_R$  y  $q$  lo cual es un efecto de bias de descubrimiento: perihelio grande: solo se detectan objetos brillantes.



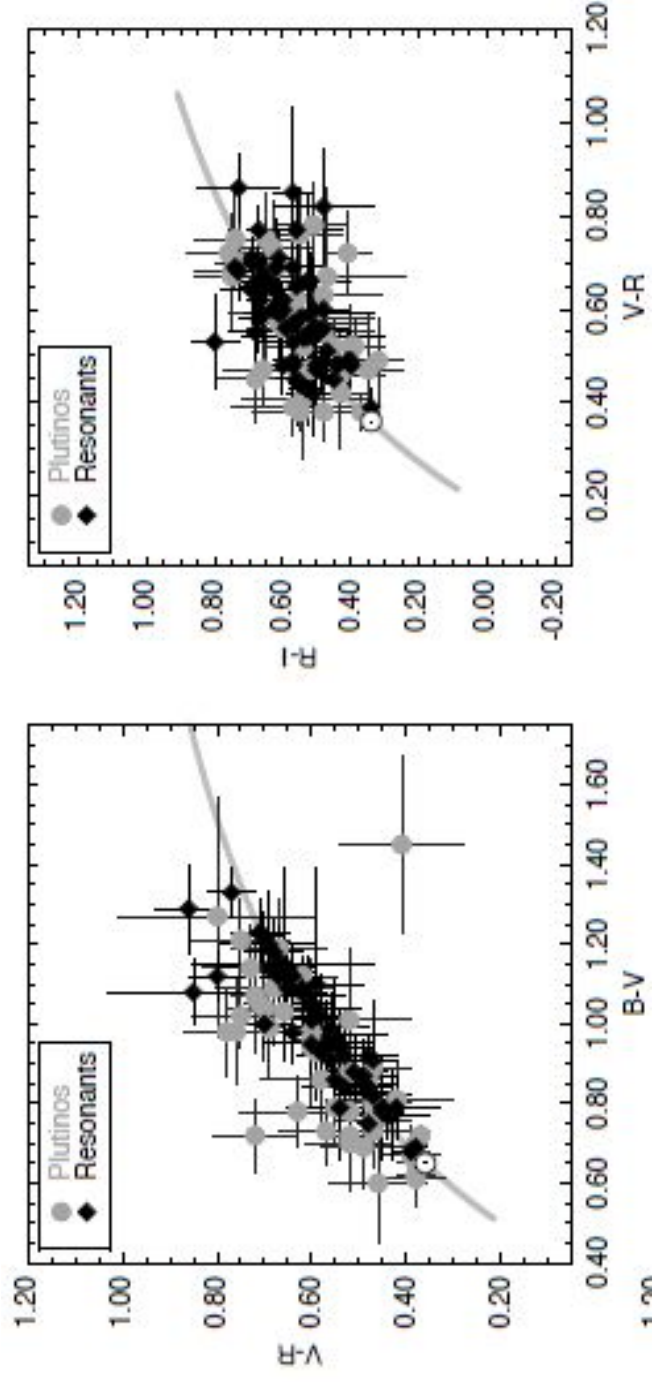
## Scattered or detached

$n=7$  detached +  $n=15$  scattered o detached = un mismo grupo (SDKBOs).  
Fuertes correlaciones entre colores que pueden considerarse como interpolaciones. Por ej. si tenemos un espectro chato, (B-R) o (V-I) pueden verse como interpolaciones del (B-I). Pero la muestra es muy pobre y se pierde cualquier tipo de correlación.



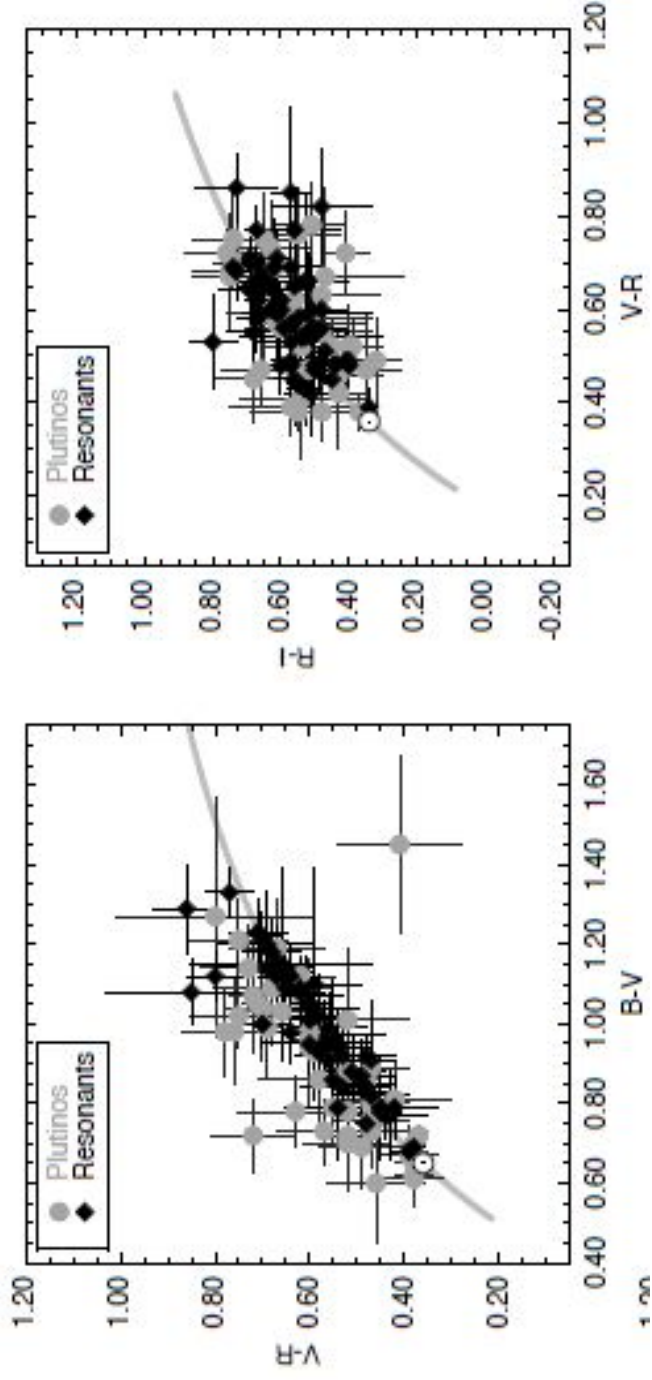
## Plutinos

$n=49$ . Todos los índices de color se correlacionan entre sí con excepción de (V-R) vs (R-I), pero si hay correlación de (B-V) con (V-R) y (B-R) con (V-I). Por tanto es posible extrapolación o interpolación, pero se necesita si o si la banda B. No hay correlación entre colores y parámetros orbitales.



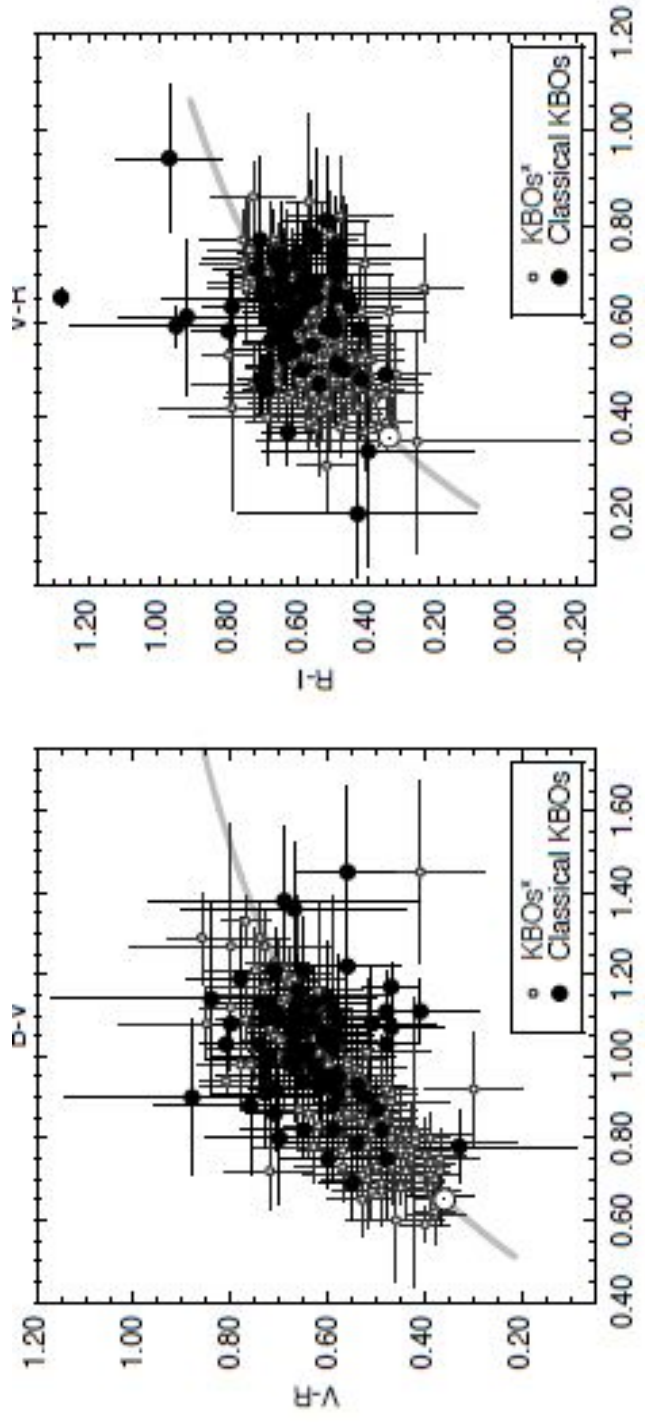
## Otros resonantes

$n=71$  (sacan Haumea family). Todos los índices de color se correlacionan entre sí. Hay una correlación moderada entre  $H_R$  y  $q$  que sugiere que hay un bias de descubrimiento como los SDOs. No hay correlación entre colores y parámetros orbitales. La muestra como un todo no requeriría de más observaciones para detectar correlación, pero si cada resonancia.



## Clasicos

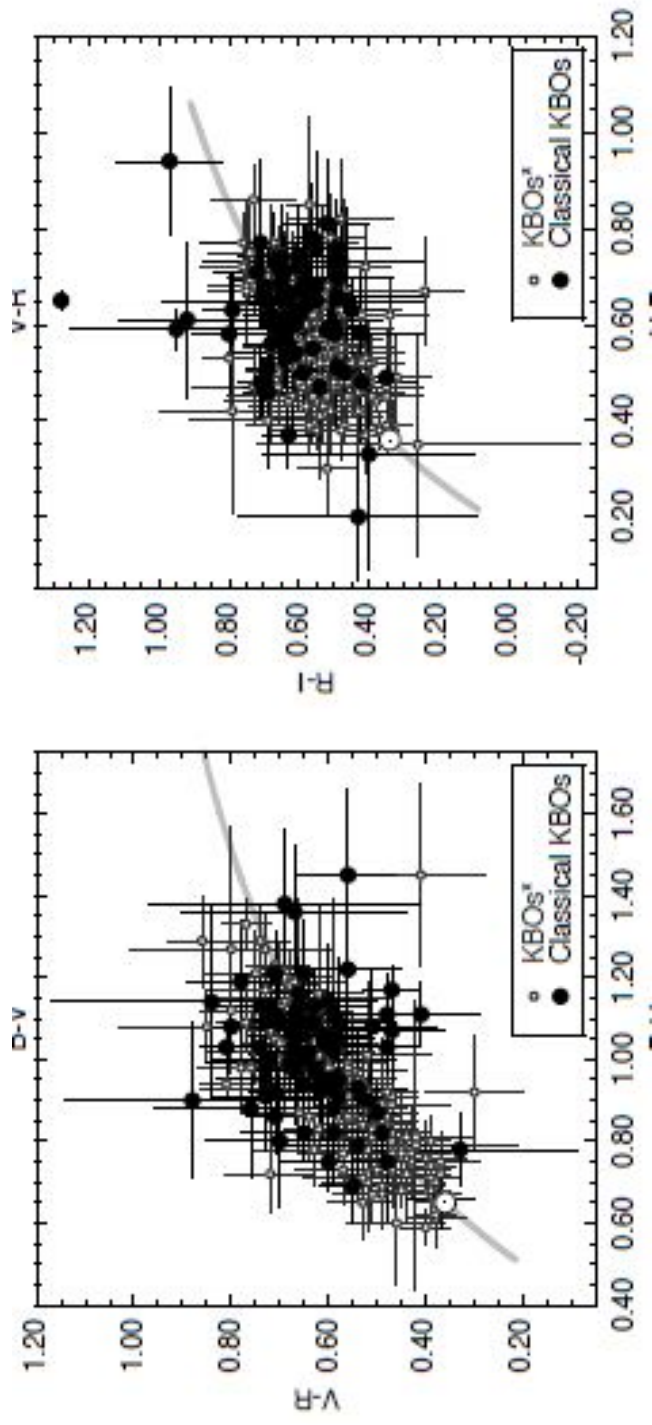
n=117 (sacan Haumea family) y otros casos especiales. Es la única población que no muestra correlación (B-V) vs (V-R) ni (V-R) vs (R-I). Si muestran moderadas a fuertes correlaciones de los colores con  $i$ ,  $v_c$ ,  $\Psi$ ,  $T_N$  y  $q$





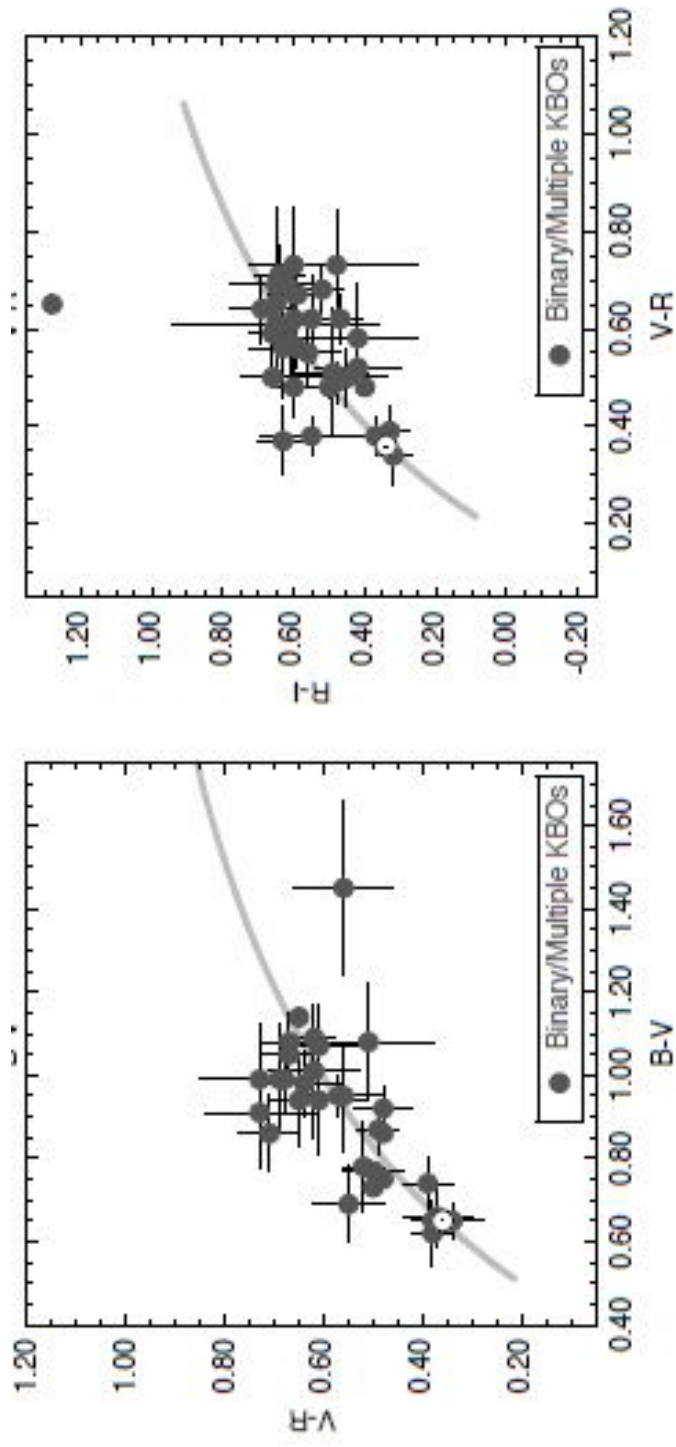
Todos

n=322 (sacan Haumea family, Cent y retrógrados).

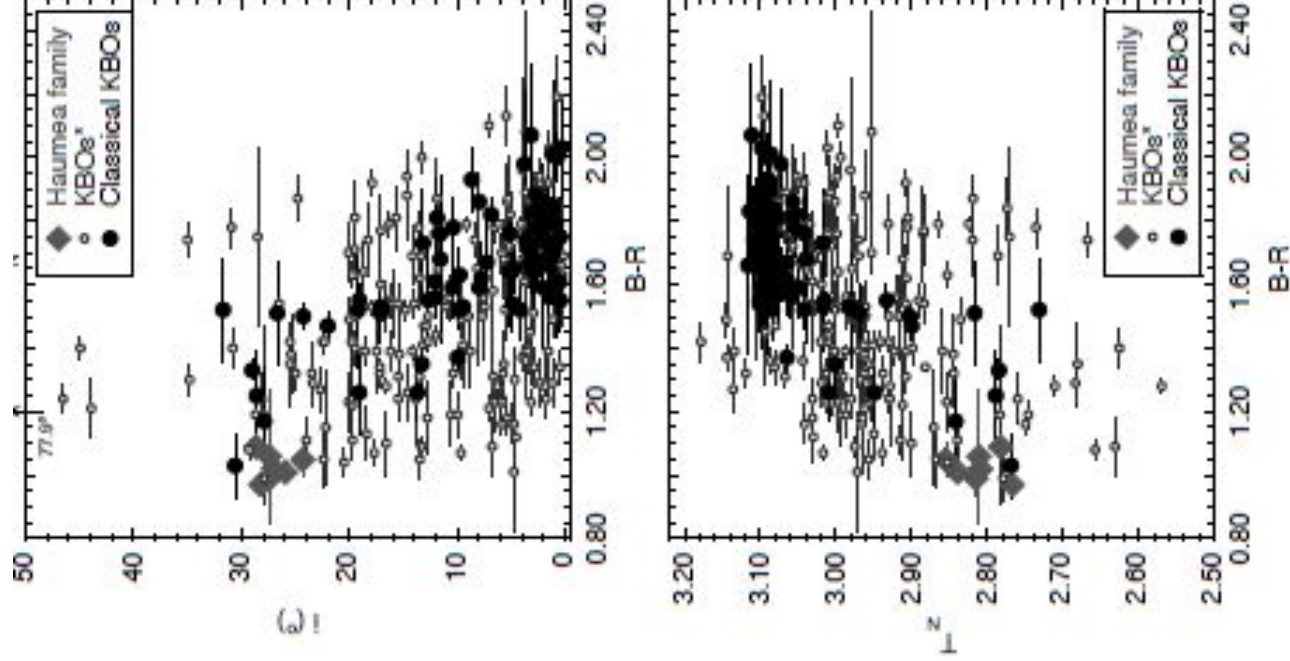


## Binarios o múltiples

n=48. Correlación de colores similares a casos anteriores. Correlación de colores con  $T_N$ ,  $v_c$  e i.



En todo se observa que la correlación entre (B-V) y (V-R) es más fuerte que entre (V-R) y (R-I). Tanto  $T_N$  como i son los parámetros que más se relacionan con las variaciones de color en los Clásicos y por tanto la relación se deba a la historia dinámica. Aunque más débil que para los clásicos, existe una correlación color-i débil para los no-clásicos.



## ALBEDOS:

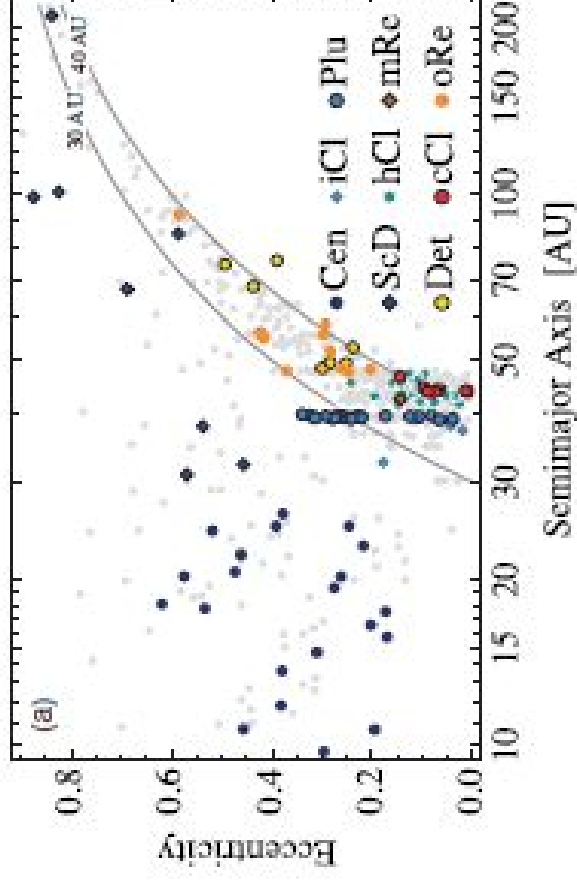
Ref. Lacerda et al. 2014 (ApJ)

Analizan datos de albedo de 109 TNOs y Centauros obtenidos usando Herschel (telescopio espacial de 3.5 mt que opera en el lejano IR y submilimetricas.

Los datos pertenecen al survey “TNOs Are Cool” para medir albedos y tamaños de 130 TNOs y Centauros.

Usan la clasificación dinámica de Gladman et al. 2008. (Cen = Centauros, iCl = inner classicals, Plu = Plutinos, ScD = scattered disk,

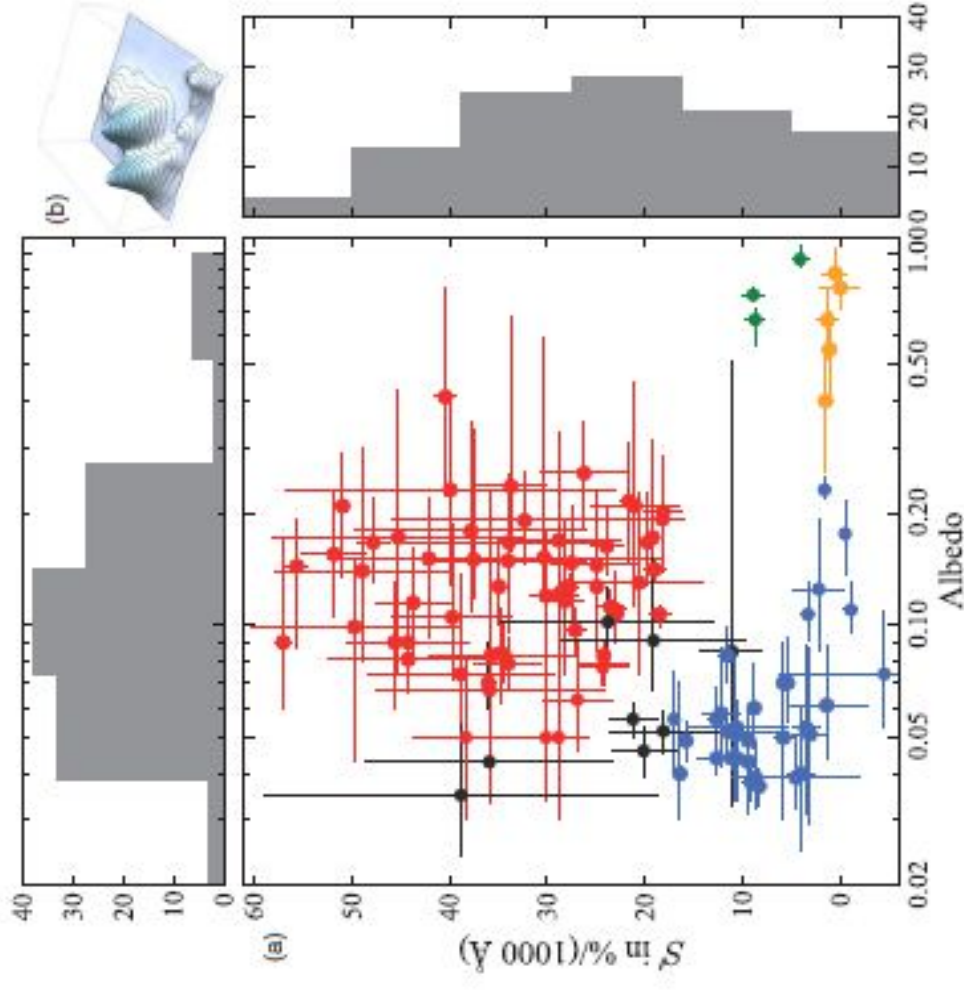
hCl = hot classicals, mRe = middle resonants, Det = detached, cCl = cold classicals, oRe = outer resonants).



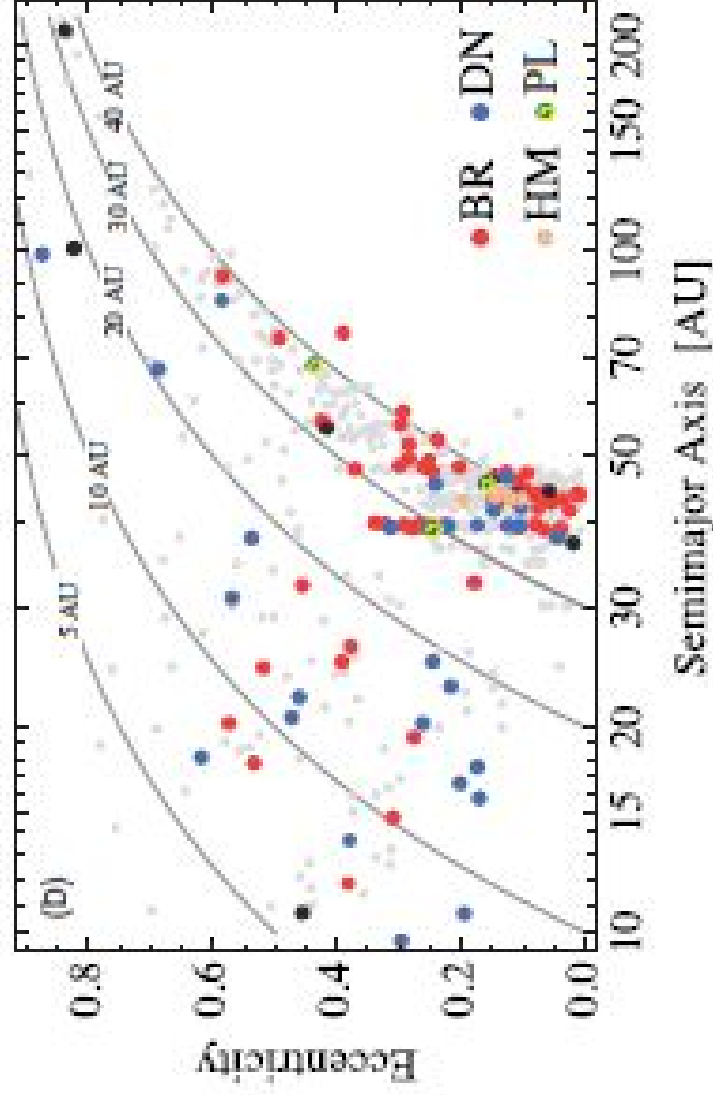
Se grafica los albedos (geométricos,  $V$ ) vs la pendiente espectral ( $S'$ ) o “color”. Los TNOs se agrupan en dos clusters:

- Un grupo oscuro, neutro con albedos bajos ( $p_v \sim 0.05$ ,  $S' \sim 10\%$ )
- Un grupo brillante y rojos con albedos altos y pendientes más rojas ( $p_v \sim 0.15$ ,  $S' \sim 35\%$ )

Existe un grupo pequeño de objetos brillantes neutros de albedos ultra altos que incluyen los TNOs grandes.



Se muestra la distribución orbital de los objetos brillantes rojos (BR) y oscuros neutros (DN). (HM) son la flia Haumea y (PL) los planetas enanos. Los TNOs con ambos tipos de superficie existen en toda la región y no hay una tendencia obvia.



## Conclusiones

- La mayoría de los TNOs tienen dos tipos de superficies: oscura y neutra y brillantes y rojas. Esto está relacionado con la bifurcación de colores de los TNOs pequeños y excitados y Centauros.
- Los TNOs clásicos fríos, los detached y los resonantes de la 2:1 en adelante, que se supone que se formaron y permanecieron en el sistema solar exterior, tienen superficies brillantes y rojas.