

Tesis de Licenciatura en Astronomía

Modelado de la luz difusa intergaláctica en el cúmulo de Fornax

Por: Alejandro Cifuentes Cárdenas

Director: Dr. Sergio A. Cellone

Codirector: Dr. Juan Carlos Forte



Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas

Universidad Nacional de La Plata

Marzo 2005

A mis padres.

“Porque nada hay encubierto, que no haya de ser descubierto; ni oculto que
no haya de ser revelado”

Lucas 12:2

Índice General

1	Introducción	1
1.1	Motivación y objetivos de este trabajo	4
2	Catálogos y clasificación	5
3	Perfiles de brillo superficial	6
3.1	Definiciones	6
3.2	Parámetros que determinan forma, tamaño e intensidad de las isofotas de una galaxia	7
3.3	Parámetros globales que se obtienen del SBP	8
3.4	Ley de Sérsic	9
4	Reconstrucción de los parámetros físicos y geométricos	10
4.1	Galaxias enanas	10
4.2	Galaxias espirales	11
4.3	Galaxias elípticas	12
4.4	Galaxia Central NGC 1399	13
5	Simulación de la imagen astronómica	16
6	Análisis de la imagen simulada	20
6.1	Fotometría . . .	20
6.2	Perfil de brillo superficial del cúmulo	22

7	Cúmulos globulares	25
8	Conclusiones	29
9	Referencias	31
A	Bases de datos on-line	33
B	Programas	34

Capítulo 1

Introducción

El concepto de luz estelar intracumular (ICL) fue propuesto por Zwicky (1951), ya que observó un exceso de luz entre las galaxias del cúmulo de Coma. Estas observaciones son difíciles de realizar e interpretar ya que se trata de un fenómeno de bajo brillo superficial, típicamente menor al 1% del brillo del cielo en las bandas ópticas. También se presentan problemas por dispersión de luz debido a objetos brillantes cercanos y contribución de fuentes discretas. A pesar de estas dificultades, la luz intracumular (ICL) es de gran interés para estudiar galaxias y la evolución de cúmulos de galaxias.

En cuanto a la composición de esta luz, se han observado desde telescopios en tierra estrellas individuales y nebulosas planetarias intracumulares. Se detectaron gigantes rojas usando Hubble Space Telescope (HST), en los cúmulos de Virgo y Fornax (Arnaboldi et al. 1996, Theuns & Warren 1997, Feldmeier 2000 Durrel et al. 2002). También hay evidencia de supernovas intracumulares (Gal-Yam et al. 2002). Estas estrellas individuales intracumulares serían buenos indicadores para estudiar en detalle la cinemática, metalicidad y edad de poblaciones estelares intracumulares en cúmulos de galaxias cercanos.

En algunos trabajos se presenta la posibilidad que cúmulos globulares estén asociados al potencial gravitatorio del cúmulo de galaxias y no a una galaxia en particular, como resultado de la interacción o mergers entre galaxias, o podrían

haberse formado en el medio ambiente del cúmulo de galaxias (Bassino et al. 2003, Minitti et al. 1998, Kissler-Patig et al. 1999).

Otro aspecto de la ICL descubierto, es material estelar en forma de arcos, en algunos de ellos con formación estelar, posiblemente originados como resultado de la acción de fuerzas de marea entre las galaxias y el potencial gravitacional del cúmulo. Las características de estos arcos son el tamaño (~ 100 kpc), bajo brillo superficial ($\mu_v \sim 26$ mag/arcsec²), encontrados en galaxias cercanas y no debido a cúmulo lentes gravitacionales (Calcáneo-Roldán et al. 2000, Trentham & Mobashe 1998). Observando la morfología y la cinemática de estos arcos se puede aprender acerca de las órbitas de caídas de galaxias y el potencial gravitacional de cúmulos de galaxias.

La evolución dinámica de estos sistemas es compleja, involucrando procesos que no están completamente entendidos, tales como: encuentros galácticos, materia oscura, fenómenos de acreción y fuerzas de marea (Dressler 1984).

La ICL provee una forma de estudiar estos diferentes mecanismos. Numerosos estudios sugieren que entre el 10 % y 70 % de la luminosidad total de un cúmulo podría estar contenido en la ICL (Richstone & Malumuth 1983, Miller 1983), con una fuerte dependencia del estado dinámico del cúmulo.

Las propiedades de la ICL podrían también ser sensibles a la distribución de materia oscura en cúmulos de galaxias. Simulaciones han mostrado que la estructura de halos de materia oscura en galaxias jugaría un rol central en la formación y evolución de restos de material generados por efecto de fuerzas de marea (Dubinski, Mihos & Hernquist 1996, 1999). Si los halos oscuros de las galaxias del cúmulo fuesen truncados por fuerzas de marea a radios pequeños (Whitmore, Forbes & Rubin 1988), el material arrancado podría fácilmente no quedar ligado a las galaxias y terminar siendo distribuido suavemente a través del cúmulo. Contrariamente, si los halos de las galaxias del cúmulo sobreviven, el material arrancado podría permanecer ligado a esas galaxias, dejándolas rodeadas por cáscaras de muy bajo brillo superficial. La ICL puede

ser sensible a los mecanismos de fuerzas de marea, la distribución de materia oscura alrededor de las galaxias y evolución del cúmulo en general.

Otra área en progreso son los estudios numéricos de la evolución dinámica de galaxias en cúmulos. Las simulaciones de alta resolución de N-cuerpos, son capaces de trabajar con cientos de cúmulos de galaxias interactuando dentro de un contexto cosmológico. Estas simulaciones de alta calidad permiten corroborar predicciones de la producción y propiedades de la luz estelar intracumular. Cuando se combinan estos estudios, se tiene un marco de referencia teórico, en el cual se pueden interpretar las observaciones de la ICL.

Otra faceta interesante de la ICL en cúmulos es la naturaleza de las envolturas cD. Las galaxias cD están caracterizadas por un exceso de luz (comparada con la ley $r^{1/4}$) a grandes radios. El origen de estas envolturas no es claro. ¿Se formaron inicialmente con el colapso del núcleo, o más tarde, cuando otras galaxias continúan cayendo hacia el cúmulo y las fuerzas de marea actúan sobre ellas? La distribución detallada de la luz de la envoltura cD puede tener la respuesta. La mecánica estadística de relajación violenta naturalmente produce perfiles $r^{1/4}$ (Lynden - Bell 1966); si las envolturas cD se formaron durante el colapso del cúmulo, deberían mostrar este perfil. De otra manera, la acreción continua de otras galaxias no necesita producir un perfil $r^{1/4}$, ya que la luz en la acreción será más sensible a la energía orbital y momento angular de las galaxias acretadas.

Otra contribución a la ICL es la luz de las zonas externas de las galaxias. Actualmente, las restricciones observacionales sobre la ICL son todavía pobres debido a la gran escasez de datos referidos a la cuantificación de la ICL en cúmulos, en función de algunas propiedades del cúmulo.

1.1 Motivación y objetivos de este trabajo

Se busca modelar la luz difusa intergaláctica debido a la contribución de las zonas externas de las galaxias tomando al Cúmulo de Fornax como caso de estudio, dado que es relativamente cercano, por lo tanto puede también estudiarse con mayor detalle. El cúmulo se modela con la información publicada en la bibliografía para 340 galaxias catalogadas como miembros (Ferguson 1989). A través de programas FORTRAN, se reconstruirá el cúmulo simulando una imagen del mismo, buscando recuperar el perfil de brillo de cada miembro hasta muy bajos niveles de brillo superficial y así cuantificar el brillo superficial intergaláctico, estableciendo al mismo tiempo la detectabilidad de la ICL. De esta manera es posible modelar la luz difusa asociada a las galaxias del cúmulo y estimar su detectabilidad en función de las características del instrumento con el cual se desea observar. El resultado que se obtiene será también un banco de pruebas útil para estimar la cantidad de cúmulos globulares que eventualmente estarían asociados al potencial del cúmulo de galaxias.

Capítulo 2

Catálogos y clasificación

Para el cúmulo de Fornax se tomó módulo de distancia $(V - M_v)_0 = 31.4$ correspondiente a 19 Mpc (Forte et al. 2005). Se utilizó el Catálogo de Ferguson (1989), FCC de aquí en más, con 340 galaxias catalogadas como miembros. De la tabla II de este trabajo se obtuvieron: ascensión recta RA(1950), declinación Dec(1950), magnitud integrada B_t , radio efectivo r_e . Otros datos necesarios para generar las imágenes de las galaxias del cúmulo como: ángulo de posición y elipticidad, se obtuvieron de diversas bases de datos astronómicas (NED, SkyView, ADS, HyperLeda). Se consideraron galaxias enanas a las dE (dwarf elliptical), dS0 (dwarf lenticular), Im (Magellanic irregular), siendo un total de 273 galaxias del catálogo. Se consideró como galaxias espirales a las Sm, Sc, Scd, Sd, SBcd, siendo un total de 34 galaxias del catálogo. Se consideró como galaxias elípticas a: E, S0, SB0, siendo un total de 32 galaxias del catálogo de Ferguson. El perfil de la galaxia central del cúmulo de Fornax, NGC 1399, se construyó como combinación lineal del brillo de las poblaciones estelares asociadas a cada familia de cúmulos globulares (Forte et al. 2005)

Capítulo 3

Perfiles de brillo superficial

Las galaxias son objetos tridimensionales, pero las observamos proyectadas contra el “plano del cielo”. La imagen de una galaxia nos muestra entonces su **distribución de brillo superficial** (bidimensional). Sólo en algunos casos particulares, a partir de ésta se puede reconstruir la densidad tridimensional de luminosidad. La simetría que presentan muchas galaxias nos permite caracterizar esta distribución bidimensional con una función unidimensional, ya sea a través de un corte a lo largo de uno de los ejes principales, o tomando promedios sobre anillos circulares o elípticos. Esta función unidimensional es el **perfil de brillo superficial** (SBP) de la galaxia.

Se presentan a continuación algunas definiciones que se usarán en esta tesis.

3.1 Definiciones

Intensidad o brillo superficial (SB): es el flujo luminoso por unidad de ángulo sólido en la imagen.

Se debería medir entonces en unidades de flujo/stereo radianes (SR). En fotometría superficial (óptica) de galaxias no usamos stereo radianes, sino alguna otra unidad de ángulo sólido, como arcsec^2 , o bien una medida relacionada con la escala del detector (ej.: pixel^2). En general tampoco usamos unidades

convencionales de flujo (ej.: $\text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1}$), sino magnitudes o unidades instrumentales (ej.: adu/seg).

Isofota: Curva cerrada simple sobre la imagen proyectada de una galaxia, de intensidad (o brillo superficial) constante. En general se usa el mismo término para referirse a una **isofota elíptica**, o sea la elipse que mejor ajusta a una isofota dada.

3.2 Parámetros que determinan forma, tamaño e intensidad de las isofotas de una galaxia

En esta sección se darán definiciones de parámetros que determinan forma, tamaño e intensidad de la isofota de cada galaxia, que después se utilizarán para componer la imagen CCD del brillo superficial (SB) proyectado de cada galaxia.

a : Semieje mayor (SMA) de una isofota dada.

b : Semieje menor de una isofota dada.

ϵ : Elipticidad. $\epsilon = 1 - b/a$

r : Radio equivalente. $r = a \sqrt{b/a} = a \sqrt{1 - \epsilon}$.

$I(a)$: SB de la isofota de SMA a , en unidades de flujo /ángulo sólido (ej.: adu/pix²).

$I(r)$: SB de la isofota de radio equivalente r , en unidades de flujo/ángulo sólido (ej.: adu/pix²).

$\mu(r)$: SB de la isofota de radio equivalente r , en magnitudes/ángulo sólido (normalmente: mag/arcsec²).

En general, la variable independiente en el perfil de brillo superficial (SBP) puede ser r o a . Para una imagen CCD, normalmente se obtiene el perfil instrumental $I(a)$ en adu/pix², del que se puede obtener inmediatamente el perfil $I(r)$.

La transformación al perfil estándar en mag/arcsec² es:

$$\mu(r) = C_0 - 2.5 \log \left(\frac{I(r)}{t_{\text{exp}} E^2} \right), \quad (3.1)$$

donde t_{exp} es el tiempo de exposición, E es la escala del detector en arcsec/pix, y C_0 es la constante de transformación al sistema estándar (incluyendo la corrección por masa de aire, términos de color, etc.).

3.3 Parámetros globales que se obtienen del SBP

Los siguientes parámetros pueden obtenerse tanto del SBP observado como de la fórmula usada para ajustarlo. El grado de coincidencia entre unos y otros dependerá de la bondad del ajuste.

- r_e : Radio efectivo. Es el radio de la isofota que encierra la mitad del flujo integrado.
- $I(r_e) = I_e$: SB de la isofota de radio $r = r_e$ (flujo/SR).
- μ_e : Idem, en mag/arcsec².
- $\langle I(r_e) \rangle = \langle I_e \rangle$: SB promedio **dentro** de la isofota de radio $r = r_e$ (flujo/SR).
- $\langle \mu_e \rangle$: Idem, en mag/arcsec².
- $r_{26.5}$: Radio de la isofota de $\mu_B = 26.5$ mag/arcsec². En general, r_{XX} será el radio de la isofota de $\mu = XX$ mag/arcsec² en una banda determinada.

De acuerdo a las definiciones anteriores, si F es el flujo integrado:

$$\langle I_e \rangle = \frac{F}{2\pi r_e^2}; \quad \langle \mu_e \rangle = m + 2.5 \log(2\pi r_e^2) \quad (3.2)$$

donde $m = C_0 - 2.5 \log(F)$ es la magnitud integrada.

3.4 Ley de Sérsic

El perfil de brillo de una galaxia puede representarse por un perfil propuesto originalmente por Sérsic (1963) en la forma

$$I(r) = I_e \exp \left\{ -b_n \left[\left(\frac{r}{r_e} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right] \right\} \quad (3.3)$$

con tres parámetros libres: I_e y r_e según lo ya definido, y n como el parámetro que determina la forma del perfil ($n > 0$). La constante b_n depende de n y toma el valor necesario para que I_e sea el SB efectivo (notar que para $r = r_e$, queda $I(r) = I_e$).

Una forma alternativa de escribir la Ley de Sérsic es:

$$I(r) = I_0 \exp \left(-\frac{r}{r_0} \right)^N \quad (3.4)$$

donde I_0 es el SB central, r_0 es un parámetro de (seudo)escala, y $N = 1/n$.

Notar que el ajuste podría también hacerse sobre el perfil según el semieje mayor:

$$I(a) = I_0 \exp \left(-\frac{a}{\alpha} \right)^N, \quad (3.5)$$

donde $\alpha = \frac{r_0}{\sqrt{1-\epsilon}}$ es el parámetro de escala. Esta última representación es la que se usa en este trabajo para modelar el perfil de cada galaxia del cúmulo.

Capítulo 4

Reconstrucción de los parámetros físicos y geométricos

Para generar la imagen de cada galaxia se necesitan: I_0 , α , N , b/a y ángulo de posición θ . Los tres primeros parámetros determinan el perfil 1-D, y los dos últimos dan la forma 2-D (proyectada sobre el cielo). En el catálogo se encuentra: B_t y r_e . A partir de éstos, se estima I_0 , α , N . Finalmente, b/a y θ se obtienen de bases de datos astronómicas o se calculan al azar.

4.1 Galaxias enanas

Se adoptó un perfil de Sérsic según el semieje mayor, eq.(3.5). Para reconstruir el SBP necesitamos tener α , N e I_0 . La magnitud integrada, B_t es dato de FCC y a partir de Cellone, Forte & Geisler (1994) se encuentra para Fornax la siguiente relación entre B_t - N :

$$B_t = 4.891 \log(N) + 16.54, \quad (4.1)$$

de la cual se obtiene N , teniendo en cuenta además que no se encuentran galaxias con $N > 2.5$ (Trujillo et al. 2001).

A partir del primer trabajo antes mencionado se encuentra una relación entre el brillo superficial central y la magnitud integrada:

$$\mu_0 = 1.030 B_t + 5.41 . \quad (4.2)$$

La intensidad central viene dada por:

$$I_0 = 10^{0.4(C_0 - \mu_0)} \quad (4.3)$$

de cual se obtiene el brillo central I_0 .

Por otra parte la magnitud total integrada a partir del perfil analítico es:

$$B_t = \mu_0 - 2.5 \log(2\pi b/a \alpha^2) - 2.5 \log\left(\frac{\Gamma(2/N)}{N}\right) , \quad (4.4)$$

donde Γ es la función gama (ver: Abramowitz M., & Stegun I., Handbook of Mathematical Functions), obteniéndose de esta última igualdad, α .

Para las elipticidades se tomó la estadística de la forma intrínseca y distribución de los achatamientos aparentes (b/a) de Ichikawa (1989). tomando b/a a nivel de brillo de 26 mag/arcsec², en la banda B .

Para estas galaxias se tomaron ángulos de posición al azar ya que no afectan al desarrollo y resultado de este trabajo.

4.2 Galaxias espirales

Se consideró galaxias espirales a las Sm, Sc, Scd, Sd, SBcd. siendo un total de 34 galaxias del catálogo.

Para estas galaxias se utiliza el perfil exponencial, cuya forma matemática es:

$$I(r) = I_0 \exp\left(-\frac{r}{r_0}\right) , \quad (4.5)$$

es decir, caso especial de la ley de Sérsic con $N=1$.

Recordemos que se debe hallar el parámetro de escala r_0 . Para esto se toma

$r_{26.5}$ del catálogo de Ferguson. El brillo superficial en magnitudes por segundo de arco cuadrado está dado por:

$$\mu(r) = \mu_0 + 1.086 \left(\frac{r}{r_0} \right), \quad (4.6)$$

de donde

$$26.5 = \mu_0 + 1.086 \frac{r_{26.5}}{r_0}. \quad (4.7)$$

Por otra parte la magnitud integrada es

$$B_t = \mu_0 + 2.5 \log(2\pi r_0^2). \quad (4.8)$$

De estas dos últimas ecuaciones obtenemos:

$$r_0 = \frac{1.086 r_{26.5}}{26.5 - B_t - 2.5 \log(2\pi r_0^2)}, \quad (4.9)$$

donde r_0 se obtiene numéricamente.

Volviendo a la ec.(4.9), calculamos el brillo superficial central μ_0 :

$$\mu_0 = B_t - 2.5 \log(2\pi r_0^2) \quad (4.10)$$

de donde se obtiene finalmente el brillo central

$$I_0 = 10^{0.4(\mu_0 - \mu_0)}. \quad (4.11)$$

Se tomaron ángulo de posición y relación de semiejes de catálogos.

4.3 Galaxias elípticas

Se consideró galaxias elípticas a E, S0, SB0, siendo un total de 32 galaxias del catálogo de Ferguson. Para estas galaxias se utilizó el perfil de de Vaucouleurs, es decir $N=0.25$.

$$I(r) = I_e \exp \left\{ -7.67 \left[\left(\frac{r}{r_e} \right)^{\frac{1}{4}} - 1 \right] \right\} \quad (4.12)$$

es decir $N=0.25$.

$$I(r) = I_e \exp \left\{ -7.67 \left[\left(\frac{r}{r_e} \right)^{\frac{1}{4}} - 1 \right] \right\} \quad (4.13)$$

o bien

$$I(r) = I_0 \exp \left(-\frac{r}{r_0} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (4.14)$$

El flujo integrado se obtiene integrando el perfil (4.13) entre $r = 0$ e infinito, obteniéndose:

$$F = 8 \pi r_e^2 e^b I_e b^8 \Gamma(8) = 22.66 r_e^2 I_e \quad (4.15)$$

donde la constante b toma el valor necesario para que I_e sea SB efectivo, en este caso $b=7.67$.

La relación entre el brillo central y el brillo efectivo es: $I_0 = e^b I_e = 2141.5 I_e$.

La relación entre el parámetro de escala (r_0) y el radio efectivo (r_e) que se obtiene de catálogo es: $r_0 = b^{-4} r_e$, de donde se obtiene r_0 .

La magnitud integrada es

$$B_t = C_0 - 2.5 \log(22.66 r_e^2 I_e) . \quad (4.16)$$

de donde se obtiene I_e y de aquí I_0 .

Se tomaron ángulos de posición y elipticidades de catálogos.

4.4 Galaxia Central NGC 1399

Se define la frecuencia específica de cúmulos globulares, en una galaxia de magnitud absoluta en la banda v (M_v), en unidades $M_v = -15$, como:

$$S_u = N_t 10^{0.4(M_v + 15)} \quad (4.17)$$

donde N_i es el número total de cúmulos globulares, Harris & van der Bergh (1981).

Por tratarse de una galaxia cD (Schombert, 1986), el perfil de esta galaxia se construyó como combinación lineal del brillo de las poblaciones estelares asociadas a cada familia de cúmulos globulares (Forte, et al. 2005). Como está escrito en este artículo, se supone que los cúmulos globulares rojos y azules en NGC1399 tienen poblaciones estelares difusas asociadas, caracterizadas por sus frecuencias específicas intrínsecas (S_n). Una generalización del parámetro S_n en cualquier banda fotométrica, en particular, la banda B (azul de Johnson), lleva a una luminosidad compuesta (en unidades $M(B) = -15$):

$$L(B) = \frac{N(RGC)}{S_B(RGC)} + \frac{N(BGC)}{S_B(BGC)}, \quad (4.18)$$

donde $N(RGC)$, $N(BGC)$ son las densidades proyectadas por unidad de área de los cúmulos globulares rojos y azules respectivamente, y el módulo de distancia corregido por extinción es:

$$(V - M_v)_0 = \mu_B - A(B) - M(B) \quad (4.19)$$

donde μ_B es el brillo superficial de la galaxia, $A(B)$ es la extinción interestelar a lo largo de la línea de la visual en la banda azul y $M(B) = -2.5 \log(L(B) \times 10^6)$ es la magnitud absoluta azul por unidad de área, si $L(B)$ está dada en unidades de brillo absoluto de $M(B) = -15$ y si ambas frecuencias específicas se suponen que permanecen constantes con el radio galactocéntrico, luego

$$\begin{aligned} \mu_B = & (V - M_v)_0 + A(B) + 2.5 \log[S_B(RGC)] \\ & - 2.5 \log\left[N(RGC) + \frac{N(BGC)}{C(B)}\right], \end{aligned} \quad (4.20)$$

donde $C(B)$ es la razón de las frecuencias específicas $S_B(BGC)/S_B(RGC)$. La expresión para μ_B muestra que si las densidades por unidad de área de ambas familias de cúmulos como función del radio galactocéntrico son determinadas de las observaciones, la forma del perfil de brillo superficial dependerá sólo del

mismo perfil anterior se extiende hasta estas distancias.

Se obtuvieron los siguientes parámetros del ajuste: $\mu_0=3.74$ mag/arcsec².

$\alpha=4.82E-13$ arcsec, $N=0.0878$ y magnitud integrada $B_T=8.81$ mag.

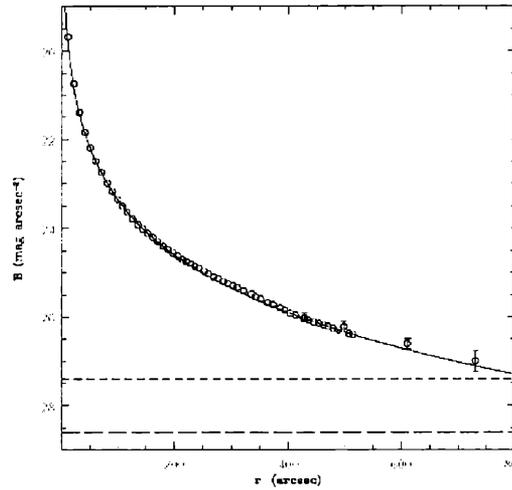


Figura 4.1: Perfil de brillo superficial azul para NGC 1399 como función del radio equivalente, donde los círculos son las observaciones y la línea es el ajuste de Sérsic (Forte et al. 2005).

Capítulo 5

Simulación de la imagen astronómica

Si bien no se intenta simular la imagen producida por un CCD real, para fijar ideas se tomaron las características del mosaico CCD del telescopio de 4 metros de CTIO: ganancia de $2 e^-/\text{adu}$, ruido de lectura de $7e^-$. Para el brillo del cielo en el azul se tomó un valor típico para Cerro Tololo de $22.7 \text{ mag/arcsec}^2$ equivalente a 40000 adu/pix^2 .

Se tomó una escala de $1.8''/\text{pixel}$. Se realizó un programa FORTRAN para simular una imagen astronómica de $4^\circ \times 4^\circ$ (8000 pixel x 8000 pixel) comprendiendo a todas las galaxias del cúmulo. Por razones de capacidad de memoria de las máquinas del Aula Informatizada de FCAGLP, ya que una imagen de estas ocupa 250 Mb, se dividió al cúmulo de Fornax en 4 cuadrantes: noreste, noroeste, sudeste, sudoeste, de $2^\circ \times 2^\circ$ cada uno. Se generaron imágenes con ruido poissoniano y sin ruido, incluyendo NGC 1399 y sin ella.

La magnitud integrada de una estrella con flujo F , observada con tiempo de exposición t_{exp} es:

$$B_t = C_0 - 2.5 \log \left(\frac{F}{t_{\text{exp}}} \right). \quad (5.1)$$

Para los datos de CTIO se tiene, considerando que para una estrella de magnitud $B = 20$ mag se tienen $330 \text{ e}^-/\text{seg}$:

$$20 \text{ mag} = C_0 - 2.5 \log(165 \text{ adu/seg}) ; \quad (5.2)$$

luego la constante de transformación al sistema standard es $C_0 = 25.54$.

La expresión para el brillo superficial es (ver 3.1):

$$\mu(r) = C_0 - 2.5 \log\left(\frac{I(r)}{t_{\text{exp}} E^2}\right) . \quad (5.3)$$

Si requerimos que $31 \text{ mag/arcsec}^2 \equiv 75 \text{ adu/pix}^2$, para tener suficiente señal a bajos niveles de brillo superficial, resulta que el tiempo de exposición es de 3600 seg.

Teniendo en cuenta que se buscó resolver el 1% del brillo del cielo se requirió una resolución de 0.1 adu. Se establece un brillo superficial de corte de 22.4 mag/arcsec², es decir, que las partes más brillantes que este nivel para cada galaxia se truncaron para mantener el rango dinámico en la región de interés, ya que nos interesa la contribución al brillo de las zonas más externas de cada galaxia a la luz intracumular.

Para asegurarnos que se reprodujeran las galaxias del catálogo se realizó una corrida del programa sin truncar el brillo de las galaxias, recuperando así la magnitud integrada del catálogo de Ferguson, lo cual se verificó mediante fotometría con la tarea *phot* de IRAF.

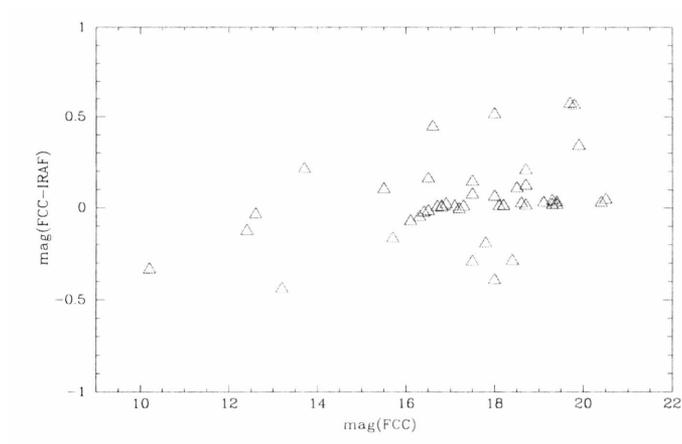


Figura 5.1: Diferencia de magnitudes entre FCC y la simulación del cúmulo de Fornax.

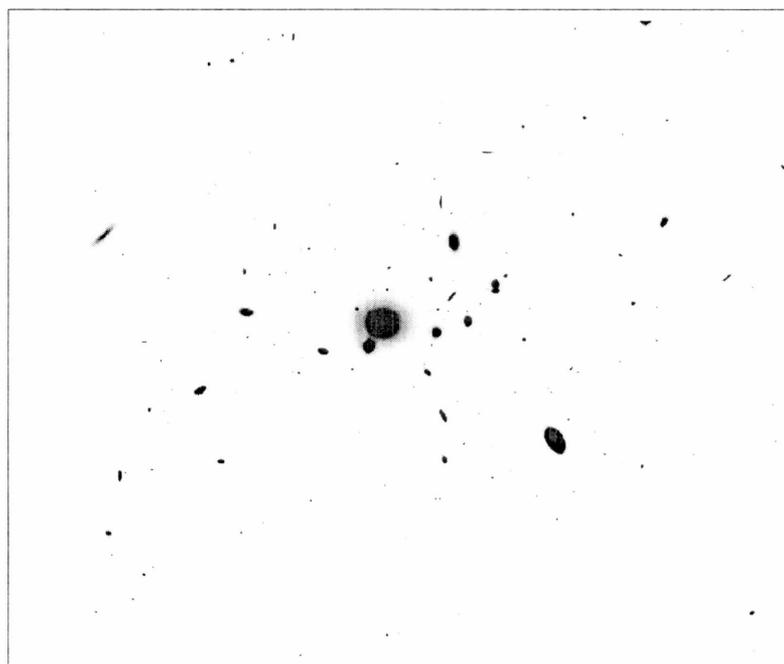


Figura 5.2: Simulación de la imagen CCD del cúmulo Fornax.

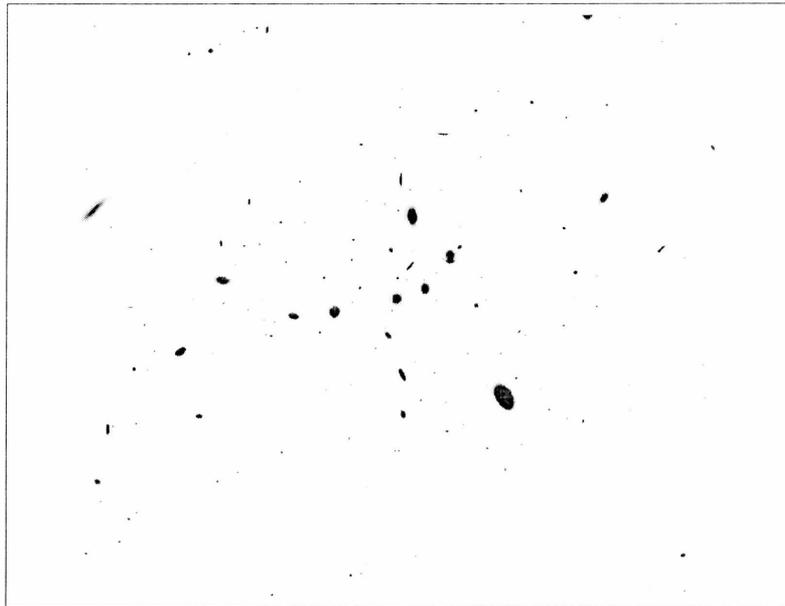


Figura 5.3: Simulación de la imagen CCD del cúmulo de Fornax, sin NGC 1399.

Capítulo 6

Análisis de la imagen simulada

En este capítulo se describe el análisis de la imagen simulada, tendiente a cuantificar la ICL generada por las galaxias y su detectabilidad. Se usaron técnicas de fotometría de abertura y superficial con IRAF.

6.1 Fotometría

Se realizó fotometría de abertura sobre las imágenes sin ruido incluyendo la galaxia central NGC 1399 y sin ella, utilizando la tarea *phot* de IRAF, para ver de qué manera afecta esta galaxia al brillo intergaláctico.

Para esto se tomaron 2500 campos circulares adyacentes sobre toda la imagen de 67 pixeles de radio, equivalente a 2 arcmin.

Se le restó el cielo, $\mu_B=22.7$ mag/arcsec² equivalente a 40000 adu/pix². No se tuvieron en cuenta los pixeles rechazados en el área de las aberturas al realizar la estadística. Se compararon los diafragmas débiles con el brillo del cielo encontrando una diferencia marginal, respecto de los errores en las magnitudes, obteniéndose los valores de la siguiente tabla:

FORNAX SB	% de campos	sin NGC 1399 SB	% de campos
$\mu_B > 26 \text{ mag/arcsec}^2$	99 %	$\mu_B > 26 \text{ mag/arcsec}^2$	99 %
$\mu_B > 27 \text{ mag/arcsec}^2$	97 %	$\mu_B > 27 \text{ mag/arcsec}^2$	99 %
$\mu_B > 28 \text{ mag/arcsec}^2$	93 %	$\mu_B > 28 \text{ mag/arcsec}^2$	98 %
$\mu_B > 29 \text{ mag/arcsec}^2$	87 %	$\mu_B > 29 \text{ mag/arcsec}^2$	96 %

Se observa que la contribución a bajo brillo superficial de la galaxia central NGC 1399 es importante, mostrando que se debe ser cuidadoso al cuantificar un cielo genuino.

Alternativamente, puede tenerse una estadística pixel a pixel, que se muestra en la siguiente tabla:

FORNAX SB	% de pixeles	sin NGC 1399 SB	% de pixeles
$\mu_B > 26 \text{ mag/arcsec}^2$	99.1 %	$\mu_B > 26 \text{ mag/arcsec}^2$	99.4 %
$\mu_B > 27 \text{ mag/arcsec}^2$	98.1 %	$\mu_B > 27 \text{ mag/arcsec}^2$	99.0 %
$\mu_B > 28 \text{ mag/arcsec}^2$	96.0 %	$\mu_B > 28 \text{ mag/arcsec}^2$	98.4 %
$\mu_B > 29 \text{ mag/arcsec}^2$	91.5 %	$\mu_B > 29 \text{ mag/arcsec}^2$	97.5 %

Estos valores muestran que las galaxias sin la presencia de NGC 1399 contribuyen muy poco al brillo superficial del cúmulo teniendo un alto porcentaje de pixeles disponibles para brillos superficiales bajos, mientras que con la presencia de la galaxia central hay un porcentaje menor de pixeles disponibles. Este estudio resulta útil para ubicar las zonas más adecuadas para la detectabilidad de la ICL en un cúmulo de galaxias.

6.2 Perfil de brillo superficial del cúmulo

Para obtener el SBP del cúmulo de Fornax se aplicó la tarea *ellipse* de IRAF. Para asegurarnos de trabajar a bajo brillo superficial se enmascararon las galaxias, con una magnitud de corte de $\mu_B=22.4$ mag/arcsec², obteniendo el flujo y el SB del cúmulo de galaxias teniendo en cuenta la presencia y ausencia de NGC 1399.

Se hicieron varias corridas de esta tarea con todos los parámetros variables, luego para evitar que a bajo brillo superficial estos parámetros oscilen, se fijan con los valores que salen de las zonas con alta relación señal-ruido y así encontrar valores fijos para la elipticidad y ángulo de posición, encontrando $e=0.2$ y $\theta=80^\circ$, centrado en NGC 1399, para todo el cúmulo.

En la figura 6.1 se observa que el perfil de todo el cúmulo ajusta razonablemente bien con una ley de $r^{1/4}$. La densidad luminosa proyectada del cúmulo sin la galaxia central NGC 1399 alcanza un mínimo en $\mu_B=34.2$ mag/arcsec² (1 adu), como se observa en el gráfico.

En la fig 6.2 para los flujos integrados se tiene que la magnitud integrada para todo el cúmulo es $B_T=8.98$ mag, mientras que restada NGC 1399 la magnitud es $B_T=10.28$ mag, teniendo $\Delta m=-1.3$ mag, esto indica que hay un factor 3.3 en el brillo, es decir que la luz difusa de NGC 1399 y la del resto del cúmulo es 3.3 veces más brillante que la luz difusa del resto del cúmulo. teniendo en cuenta que el brillo de las galaxias está truncado para valores más brillantes que 22.4 mag/arcsec².

Comparativamente, sin truncar el brillo de las galaxias, se tiene que utilizando la magnitud tabulada en el catálogo de Ferguson para NGC 1399 ($B_T=10.6$ mag). la magnitud integrada del cúmulo es $B_T=7.8$ mag. es decir el cúmulo es 13 veces más brillante que NGC 1399. Si al cúmulo se le resta la galaxia central la magnitud integrada del cúmulo es $B_T=7.885$ mag.

Si se considera para NGC 1399 ($B_T=8.9$ mag) de Forte et al.(2005), la mag-

veces más brillante que NGC 1399.

Finalmente se tiene que Fornax con la magnitud de NGC 1399 tomada de Forte et al. (2005) es 1.3 veces más brillante que Fornax con la magnitud de NGC 1399 tomada de FCC.

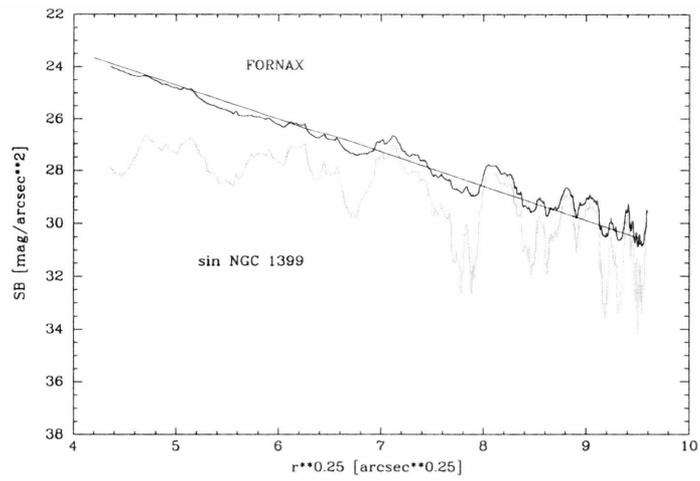


Figura 6.1: La curva superior es el perfil de brillo de todo el cúmulo, la curva inferior es el perfil de brillo del cúmulo restada la galaxia central NGC 1399.

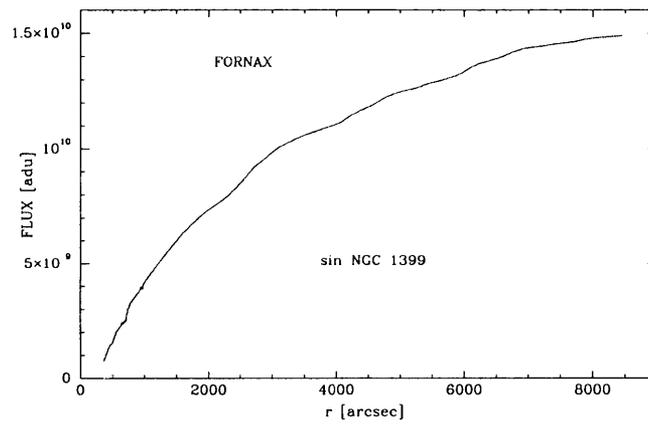


Figura 6.2: La curva superior es el flujo integrado para el cúmulo de Fornax y la curva inferior es el flujo integrado restada NGC 1399.

Capítulo 7

Cúmulos globulares

Al programa FORTRAN que simula la imagen de Fornax se agregó una subrutina que estima cantidad y ubicación de los cúmulos globulares alrededor de cada galaxia siguiendo un perfil de Hubble para la densidad de cúmulos globulares.

Para NGC 1316, se tomó una $S_n=0.9$ (Gómez et al. 2001), teniendo en cuenta que se trata de un merger y la relación masa-luminosidad es baja comparada con la de galaxias elípticas normales.

Para NGC 1365, se tomó una $S_n=1.1$, dado que es una galaxia espiral con núcleo activo y muy brillante en la banda azul.

Para NGC 1399, la galaxia dominante del cúmulo de Fornax, por tratarse de una galaxia elíptica gigante, que presenta un sistema de cúmulos muy poblado y extenso ampliamente estudiado (Geisler & Forte 1990, Dirsch et al. 2003, Faifer et al. 2005), se tienen 3800 cúmulos rojos y 8101 cúmulos azules (11901 cúmulos), con frecuencias específicas en la banda azul para los cúmulos rojos y azules, $S_B(RGC)=7.8$ y $S_B(BGC)=27.3$ respectivamente. Se tienen cúmulos observados hasta magnitud $B=26.1$, hasta 66 kpc por Forte et al (2005) y hasta 250 kpc desde el centro de NGC 1399 por Faifer et al. (2005), es decir hasta $r^{1/4}=2.6$ arcmin en la fig 7.1. Para valores entre $r^{1/4}=2.6$ y $r^{1/4}=3.3$ arcmin en la simulación, se hizo una extrapolación de la densidad de cúmulos globulares

observados.

Para el resto de las galaxias del cúmulo se tomó una frecuencia específica promedio $S_n=3.3$ y para la población estelar asociada, un índice de color promedio $B - V=0.7$. La ubicación de cada cúmulo fue al azar.

Para el resto del cúmulo de galaxias se tienen 12001 cúmulos globulares.

En la figura 7.1, se ajustó una recta por mínimos cuadrados obteniéndose, $\log_{10}(\delta) = -1.28 r^{1/4} + 2.82$, quedando bien representados los cúmulos de NGC 1399 por un perfil de $r^{1/4}$, las barras son del error Poissoneano del conteo de cúmulos sin tener en cuenta los errores del background.

Alternativamente la fig 7.2 es $\log_{10}(\delta)$ vs $\log_{10}(r)$, algunos autores ajustan 2 rectas, sin embargo no hay una razón física para esto ya que son escalas logarítmicas.

En la figura 7.3, se ajustó una recta por mínimos cuadrados, obteniéndose $\log_{10}(\delta) = -1.3 r^{1/4} + 3$, quedando bien representada la densidad de cúmulos globulares del cúmulo de Fornax restada NGC 1399.

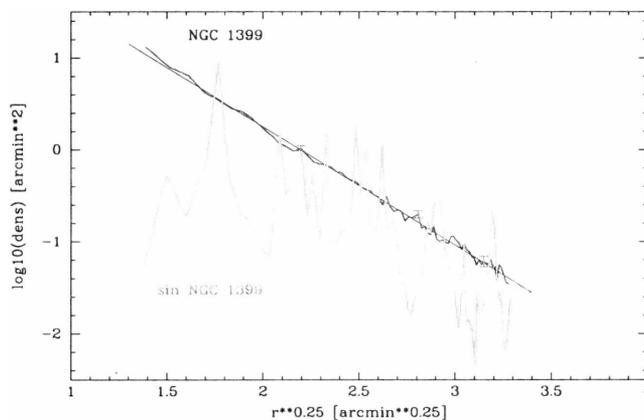


Figura 7.1: La curva superior es el perfil de densidad superficial de los cúmulos globulares de NGC 1399 vs $r^{1/4}$. La curva inferior es el perfil de densidad proyectada de cúmulos globulares pertenecientes al cúmulo de Fornax restada NGC 1399.

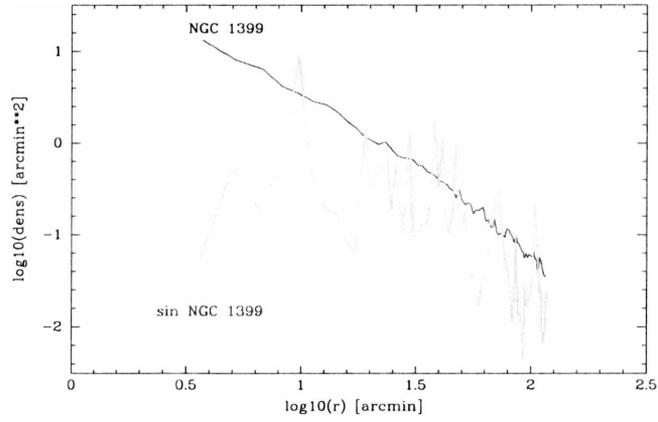


Figura 7.2: La curva superior es el perfil de densidad superficial de los cúmulos globulares de NGC 1399 vs $\log_{10}(r)$. La curva inferior es el perfil de densidad proyectada de cúmulos globulares pertenecientes al cúmulo de Fornax restada NGC 1399.

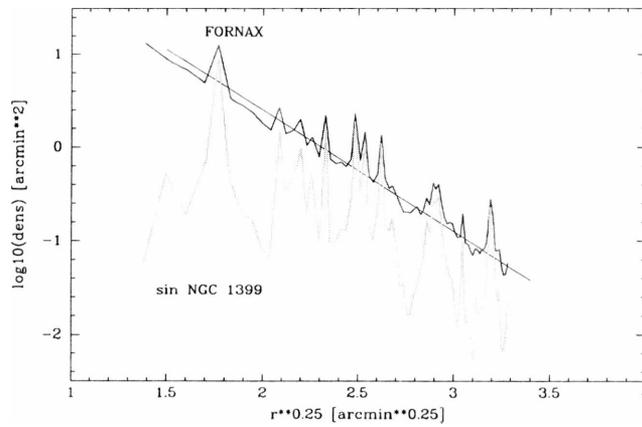


Figura 7.3: La curva superior es el perfil de densidad superficial de los cúmulos globulares de Fornax vs $r^{1/4}$. La curva inferior es el perfil de densidad proyectada de cúmulos globulares pertenecientes al cúmulo de Fornax restada NGC 1399.

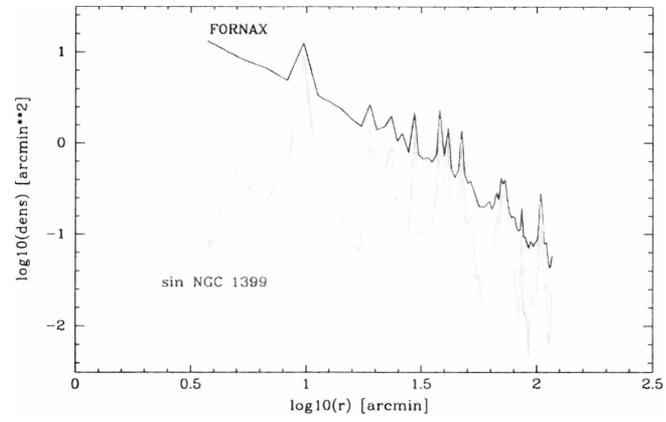


Figura 7.4: La curva superior es el perfil de densidad superficial de los cúmulos globulares de Fornax vs $\log_{10}(r)$. La curva inferior es el perfil de densidad proyectada de cúmulos globulares pertenecientes al cúmulo de Fornax restada NGC 1399.

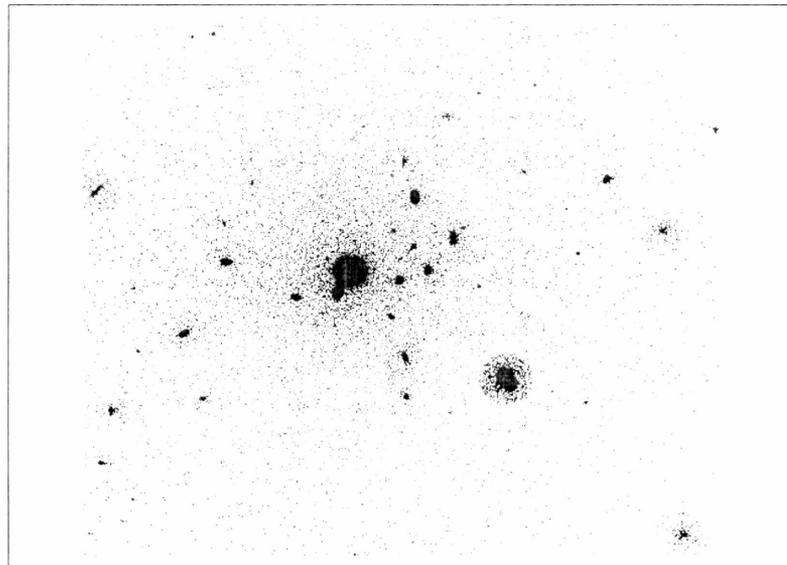


Figura 7.5: Cúmulo de Fornax con 23902 cúmulos globulares.

Capítulo 8

Conclusiones

Es posible modelar la luz difusa intracumular debido a las galaxias y estimar su detectabilidad en función de las características del instrumento para cualquier cúmulo de galaxias cercano.

Para el SBP del cúmulo de Fornax se obtiene un solo perfil de $r^{1/4}$, teniendo en cuenta que se consideró solamente el brillo externo de las galaxias y no la componente difusa intergaláctica. Algunos autores como González et al. (2005), tienen en cuenta la componente difusa no asociada a galaxias y ajustan dos perfiles de $r^{1/4}$.

Un próximo paso para este trabajo sería agregar una componente simulada de luz difusa intergaláctica y verificar su detectabilidad y posible separación de la componente galáctica.

NGC 1399 es 3.3 veces más brillante que el resto del cúmulo para brillo superficial más débil que $22.4 \text{ mag/arcsec}^2$.

Este trabajo es un banco de pruebas útil para estimar la cantidad de cúmulos globulares que eventualmente estarían asociados al potencial del cúmulo de galaxias.

Observando la fig 7.3 se ve que para Fornax, no se podrían resolver los cúmulos globulares de NGC 1399 de los de las otras galaxias por lo tanto, este trabajo sería un buen estimador de la contaminación de las velocidades radiales de los

cúmulos globulares debido a la superposición de las galaxias del cúmulo.

Capítulo 9

Referencias

- Arnaboldi, M., et al. 1996, ApJ, 472, 145
- Bassino, L., Cellone, S., Forte, J. C., Dirsch, B., 2003, A&A 399, 489
- Calcáneo-Roldán, C., Moore, B., Bland-Hawthorn, J., Malin, D., Sadler, E. M. 2000, MNRAS, 314, 324
- Cellone, S., Forte, J. C., Geisler, D., 1994, ApJS, 93, 397
- Dirsch, B., Richtler, T., Geisler, D., Forte, J. C., Bassino, L., Gieren, W., 2003, AJ, 125, 1908
- Dressler, A. 1984, ARA&A, 22, 185
- Dubinski, J., Mihos, J. C., Hernquist, L. 1996, ApJ, 462, 576
- Dubinski, J., Mihos, J. C., Hernquist, L. 1999, ApJ, 526, 607
- Durrell, P., Ciardullo, R., Feldmeier, J. J., Jacoby, G. H., Sigurdsson, S. 2002, ApJ, 570, 119
- Faifer, F., Bassino, L., Forte, J. C., Dirsch, B., Richtler, T., Geisler, D., 2005, aceptado.
- Ferguson, H. 1989, AJ, 98, 367
- Feldmeier, J. J. 2000, Ph.D. Thesis, Penn State Univ.
- Forte, J. C., Faifer, F., Geisler, D., 2005, MNRAS, 357, 56
- Gal-Yam, A., Maoz, D., Sharon, K., 2002, MNRAS, 332, 37
- Geisler, D., Forte, J. C., 1990, ApJ, 350, L5

Gómez. M., Richtler, T., Infante. L., Drenkhahn, G., 2001, A&A, 371, 875
Gonzalez, A., Zabludoff, A., Zarisky, D., 2005, ApJ, 618, 195
Harris, W., van der Bergh, S., 1981, AJ, 86, 1627
Ichikawa, S.-I., 1989, AJ, 97, 1600
Kissler-Patig, M., Grillmair, C., Meylan, G., et al. 1999, AJ, 117, 1206
Lynden-Bell, D. 1966, in IAU Symp. 25, The Theory of Orbits in the Solar System and in Stellar Systems, ed. G. Contopoulos (New York: Academic), 25, 78
Miller, G. 1983, ApJ, 268, 495
Minniti, D., Kissler-Patig, M., Goudfrooij, P., Meylan, G., 1998, AJ, 115, 121
Richstone, D., Malumuth, E. 1983, ApJ, 268, 30
Sésic, J. L., 1963, Boletín AAA N6 Pag. 41
Schombert, J., 1986, ApJSuppl, 60, 603
Theuns, T., Warren. S. J. 1997, MNRAS, 284, L11
Trentham, N., Mobasher, B. 1998, MNRAS, 293, 53
Trujillo, I., Aguerri, A., Cepa, J., Gutiérrez, C., 2001, MNRAS, 321, 269
Whitmore, B. C., Forbes, D. A., Rubin, V. C. 1988, ApJ, 333, 542
Zwicky, F., 1951, PASP, 63, 61

Apéndice A

Bases de datos on-line

Fuente	URL
NASA/IPAC Extragalactic Database (NED)	http://nedwww.ipac.caltech.edu/
ADC catalog databases	http://vizier.u-strasburg.fr/ http://adc.gsfc.nasa.gov/
SkyView	http://skyview.gsfc.nasa.gov/
Astrophysics Data System (ADS) Abstract Service	http://adsabs.harvard.edu/abstract_service.html http://cdsads.u-strasbg.fr/abstract_service.html
HyperLeda Database for physics of galaxies	http://leda.univ-lyon1.fr/
Cerro Tololo Inter-American Observatory	http://ctio.noao.edu/

Apéndice B

Programas

```
c Programa para generar imagenes artificiales de galaxias
c segun perfiles de Sersic, exponencial y de Vacouleurs

c Formato del archivo de entrada:
c  naxis1  naxis2                (tamano de la imagen [pix])
c  x0  y0                        (centro [pix])
c  sk                                           (cielo [adu/pix])
c  fifi                                       (angulo de posicion [gr])
c  bitpix                                     (BITPIX)
c  scl                                       (escala ["/pix])
c  ss=31mag/sec2==ii=75adu/pix2

include 'laplata.rea'
dimension al(10)
double precision ene,gamma,Io,rr
character*15 nom
data al/0.,0.,0.,0.18,0.18,0.33,1,0.8,0.77,0.44/

open(21,file='archi1',err=60)
```

```

read(21,*) naxis1,naxis2      ! 'Columnas (x) , Lineas (y)  '
read(21,*) sk                 ! 'cielo:           '
read(21,*) bitpix             ! 'BITPIX = '
read(21,*) nombre
close(21)

deltact=35.7*3600.
alfact=53.75*3600.
pi=4.*atan(1.)
x0=4000
y0=4000
scl=1.8
ss=20.
oo=165.
te=3600.
C1=ss+2.5 *log10(oo)+2.5*log10(te)
C0=C1+5*log10(scl)

do i=1,naxis2
  do j=1,naxis1
    imaout(i,j)=sk
  enddo
enddo

c "Perfil de Sersic:  I = Io * exp(-(R/alfa)**N)"
c   s0(i)    ! 'Io [adu/pix]: '
c   alf(i)   ! 'alfa [pix]:   '
c   ene(i)   ! 'N:           '

```

c Genera el perfil de NGC 1399

```
open(70,file='1399.dat',err=60)
read(70,*) kk,ah,am,as,dg,dm,ds,si,ba,fifi3,ene,rr
open(87,file='globsgig.out')
  alfa=(ah*3600.+am*60.+as)*15.
  delta=(-1.)*dg*3600.+dm*60.+ds
  delta1=(-1.)*dg+dm/60.+ds/3600.

  xj0=(-1.)*(alfa-alfact)*cos(pi/180.*delta1)/scl+x0
  xi0=(-1.)*(delta-deltact)/scl+y0

  s0=10**(0.4*(C0-si))
  fifi=fifi3+90
  amp1=s0
  scale=rr/(scl*sqrt(ba))
  zex=ene

call perfil(amp1,scale,zex,ba,fifi,xj0,xi0)
close(70)
```

c Genera el perfil de la galaxias enanas

```
open(25,file='coorbri.dat',err=60)
40 read(25,*,end=50) cc,ah,am,as,dg,dm,ds,bt
open(87,file='globsena.out')
  alfa=(ah*3600.+am*60.+as)*15.
  delta=(-1.)*dg*3600.+dm*60.+ds
```

```

delta1=(-1.)*dg+dm/60.+ds/3600.

xj0=(-1.)*(alfa-alfact)*cos(pi/180.*delta1)/scl+x0
xi0=(-1.)*(delta-deltact)/scl+y0

300  continue
      ba=1.*azar()
      nba=int(10.*ba)+1.
      test1=azar()
c    acepto ba?
      if(test1-al(nba))200,200,300
200  continue

      teta=180.*azar()
      fifi=teta
      if(ba.eq.1.) fifi=0.

c    calculo ene,alfa,s0
      ene=10.d0**((bt-16.5476d0)/4.8918d0)
      ene=min(ene,2.5)
      si=1.0306d0*b+5.4177

      call fgamma(ene,gamma)

      alf1=si-bt-2.5*dlog10(gamma/ene)
      alf2=10**((1.d0/2.5d0)*alf1)
      alf=sqrt((1.d0/(2*pi*ba))*alf2)

      s0=10**(0.4*(C0-si))

```

```

        amp1=s0
        scale=alf/scl
        zex=ene

call  perfil(amp1,scale,zex,ba,fifi,xj0,xi0)
call  globs(cc,scale,xx,yy,xj0,xi0,bt)

goto 40
close(87)
50   close(25)

c     Perfil de Vacouleurs:  $I = I_0 * \exp(-(R/R_0)**0.25)$ , ( $R_0 = R_e/3459.5$ )
c     I0 [adu/pix],brillo central
c     Ie [adu/pix],brillo efectivo
c     Re==ae,radio efectivo en arcsec
c     calculo Perfil de Vaucouleurs teniendo como datos
c     Bt magnitud total integrada
c     Re radio efectivo

open(25,file='resgig.dat',err=60)
open(26,file='coregig.dat',err=60)
30   read(25,*,end=34) cc,bt,rae,fifi1,ba
read(26,*,end=34) cc,ah,am,as,dg,dm,ds
open(7,file='glob21.out')

alfa=(ah*3600.+am*60.+as)*15.
delta=(-1.)*dg*3600.+dm*60.+ds
delta1=(-1.)*dg+dm/60.+ds/3600.

```

```

xj0=(-1.)*(alfa-alfact)*cos(pi/180.*delta1)/scl+x0
xi0=(-1.)*(delta-deltact)/scl+y0

Re=rae/scl
A=2141.5/(22.665*(Re**2))
B=10**(0.4*(C0-Bt))
Io=A*B
Ro=Re/3459.5
amp1=Io
zex=0.25
scale=Ro/sqrt(ba)
fifi=fifi1+90

call perfil(amp1,scale,zex,ba,fifi,xj0,xi0)
call globs(cc,scale,xx,yy,xj0,xi0,bt)

goto 30
close(7)
34 close(25)
close(26)

c Perfil exponencial  $I=I_0 * \exp(-(R/R_0))$ 
c Genera la galaxias espirales

open(27,file='exponen.dat',err=60)
open(28,file='coorexp.dat',err=60)
80 read(27,*,end=15)cc,r0,bt,fifi2,ba

```

```

read(28,*,end=15)cc,ah,am,as,dg,dm,ds
open(7,file='globsexpsn1.out')

alfa=(ah*3600.+am*60.+as)*15.
delta=(-1.)*dg*3600.+dm*60.+ds

delta1=(-1.)*dg+dm/60.+ds/3600.

xj0=(-1.)*(alfa-alfact)*cos(pi/180.*delta1)/scl+x0
xi0=(-1.)*(delta-deltact)/scl+y0

muo=bt+2.5*log10(2*pi*(r0**2))

Io=10**(0.4*(C0-muo))

Ro=r0/scl
amp1=Io
zex=1
scale=Ro/sqrt(ba)
fifi=fifi2+90

call perfil(amp1,scale,zex,ba,fifi,xj0,xi0)
call globs(cc,scale,xx,yy,xj0,xi0,bt)

goto 80
close(7)
15 close(27)
close(28)

```

```

        call subescriomod

60      end
c-----
c calculo de perfiles Sersic y de Vacouleurs
c-----

      subroutine perfil(amp1,scale,zex,ba,fifi,xj0,xi0)
      include "laplata.rea"
      double precision aae,ze

      fi=fifi*3.14159265/180.0
      cf=cos(fi)
      sf=sin(fi)

      do i=1,naxis2

          y=real(i)-xi0
          ysf=y*sf
          ycf=y*cf
          do j=1,naxis1
              x=real(j)-xj0
              xp=x*cf+ysf
              yp=ycf-x*sf
              a=sqrt(xp*xp+(yp*yp)/(ba*ba))
              if(a.lt.0.00001) a=0.00001
              aae=0.-(a/scale)**zex

c Modifico para que no haga Underflow.
              if(aae.lt.-200.) then

```

```

        ze1=0.d0
    else
        if(aae.gt.250.) then
            ze1=3.d32
        else
            ze1=amp1*dexp(aae)
        endif
    endif
    ze=ze1
    if(ze.gt.3.d32) then
        imaout(i,j)=3.e32
    else
        imaout(i,j)=ze+imaout(i,j)
    endif

enddo

enddo

return

end

```

```

c-----
c   genera numeros al azar pseudo-aleatorios con densidad de probabilidad
c   uniforme entre 0 y 1.
c-----

```

```

Function azar()
real azar
real*8 y
logical on
save on,y
if( .not.on)then

```

```

        y=43d0
        on=.true.
    endif
    y=dmod(2488942d0*y,2547483647d0)
    azar=y/2547483647d0
    return
end

c-----
c Calcula funcion gamma
c-----

subroutine fgamma(ene,gamma)
double precision a(5),x,sumg,gamma,fac,ene
data a/-0.5748646,0.9512363,-0.6998588,0.4245549,-0.1010678/

n=int(2./ene)
fac=1.d0
x=2./ene-float(n)
do k=1,n-1
    fac=fac*(x+float(k))
enddo
if(n.eq.0) fac=1./x
sumg=1.d0
do k=1,5
    sumg=sumg+a(k)*x**k
enddo
gamma=sumg*fac
return
end

```

```

c      genera un cierto numero de cumulos globulares
c      para agregar a la Fornax.simu.
c      Esta version usa un perfil de Hubble.
c      open(7,file='globsexp.out')

      subroutine globs(cc,scale,xx,yy,xj0,xi0,bt)
      bmvo=0.7
      sn=1
      pi=4.0*atan2(1.,1.)

      c=1.0
      ro=c*scale
c      transforma xmb a magnitud visual absoluta
c      adoptando bmvo=0.7 y un modulo de distancia de 31.4

      xmb=bt
      v=xmb-bmvo-31.4
c      calcula el numero de globs. suponiendo Sn=3.3 (todos)
      xn=sn*10**(-0.4*(v+15.0))

      n=xn
      suma=0.0
3     continue
c      calcula un radio galactocentrico proyectado dentro de 600 arcsecs
      r=600.0*azarr()/1.8
c      calcula la funcion de probabilidad
      f=2.0*pi*r/(1.0+(r/ro)**2)
c      normaliza la funcion a 1

```

```

    rm=ro
    fmax=2.0*pi*rm/(1.0+(rm/ro)**2)
    fn=f/fmax
c    calcula un numero de prueba
    ytest=azarr()
c    acepta o rechaza
    if(ytest-fn)2,2,3
2  continue
    suma=suma+1
c    genera un angulo de posicion entre 0 y 2pi radianes
    alfa=2.0*pi*azarr()
    x=r*cos(alfa)
    y=r*sin(alfa)
    xx=xj0+x
    yy=xi0+y

    write(7,*) cc,xx,yy
c    estas x,y deben sumarse a las del centro de cada galaxia

    if(suma-xn)3,3,4
4  continue

end

FUNCTION azarr()
REAL azar
C Genera numeros pseudo-aleatorios con densidad de probabilidad uniforme
C entre 0 y 1.

```

```
C*****  
REAL*8 y  
LOGICAL on  
SAVE on,y  
IF(.NOT.on)THEN  
    y=43d0  
    on=.TRUE.  
ENDIF  
y=DMOD(2188942d0*y,2147483647d0)  
azarr=y/2147483647d0  
RETURN  
END
```

Agradecimientos

Deseo agradecer:

A mis padres y hermano, por apoyarme, ayudarme y comprenderme siempre de la mejor manera.

A mis amigos Sergio, Martín, Marcela, Iris, Pablo y Jorge por su cariño, respeto y aliento permanente.

A mis bajitos, Belén, Gabriel, Maité, Román y Eleonora.

A la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas de la U.N.L.P. por facilitarme todo para llegar a concluir esta tesis.

Al Dr: Sergio A. Cellone y Dr: Juan Carlos Forte, por su paciencia, generosidad y humildad para conmigo.

A Analía, Gisela, Luis, Josefa, Silvia, Lilia, Sofía, Erica, Juan y Favio, por ese “vamos muñeco”.

A Federico y Rodolfo por ayudarme en la sala de computadoras a cada pedido de auxilio y no permitir que haga estallar ninguna máquina.

A todos GRACIAS!!

