

Non-fiducial cosmological test from geometrical and dynamical distortions around voids

Carlos M. Correa,^{1,2★} Dante J. Paz,^{1,2} Nelson D. Padilla,^{3,4} Andrés N. Ruiz,^{1,2}
Raúl E. Angulo,^{5,6} and Ariel G. Sánchez⁷

¹*Instituto de Astronomía Teórica y Experimental, UNC-CONICET, Laprida 854, X5000BGR-Córdoba, Argentina*

²*Observatorio Astronómico de Córdoba, Universidad Nacional de Córdoba, Laprida 854, X5000BGR-Córdoba, Argentina*

³*Instituto de Astrofísica, Pontificia Universidad Católica de Chile, Av. Vicuña Mackenna 4860, Santiago, Chile*

⁴*Centro de Astro-Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile, Av. Vicuña Mackenna 4860, Santiago, Chile*

⁵*Donostia International Physics Centre (DIPC), Paseo Manuel de Lardizabal 4, 20018 Donostia-San Sebastian, Spain*

⁶*IKERBASQUE, Basque Foundation for Science, E-48013, Bilbao, Spain*

⁷*Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik, Postfach 1312, Giessenbachstr., 85741 Garching, Germany*

MNRAS

DOI: 10.1093/mnras/stz821

<https://arxiv.org/abs/1811.12251>

Seminario I de Doctorado



Índice

Portada

Carlos Mauricio Correa
Director: Dr. Dante Paz
Seminario I de Doctorado
FaMAF - IATE - OAC

Introducción

Mediciones

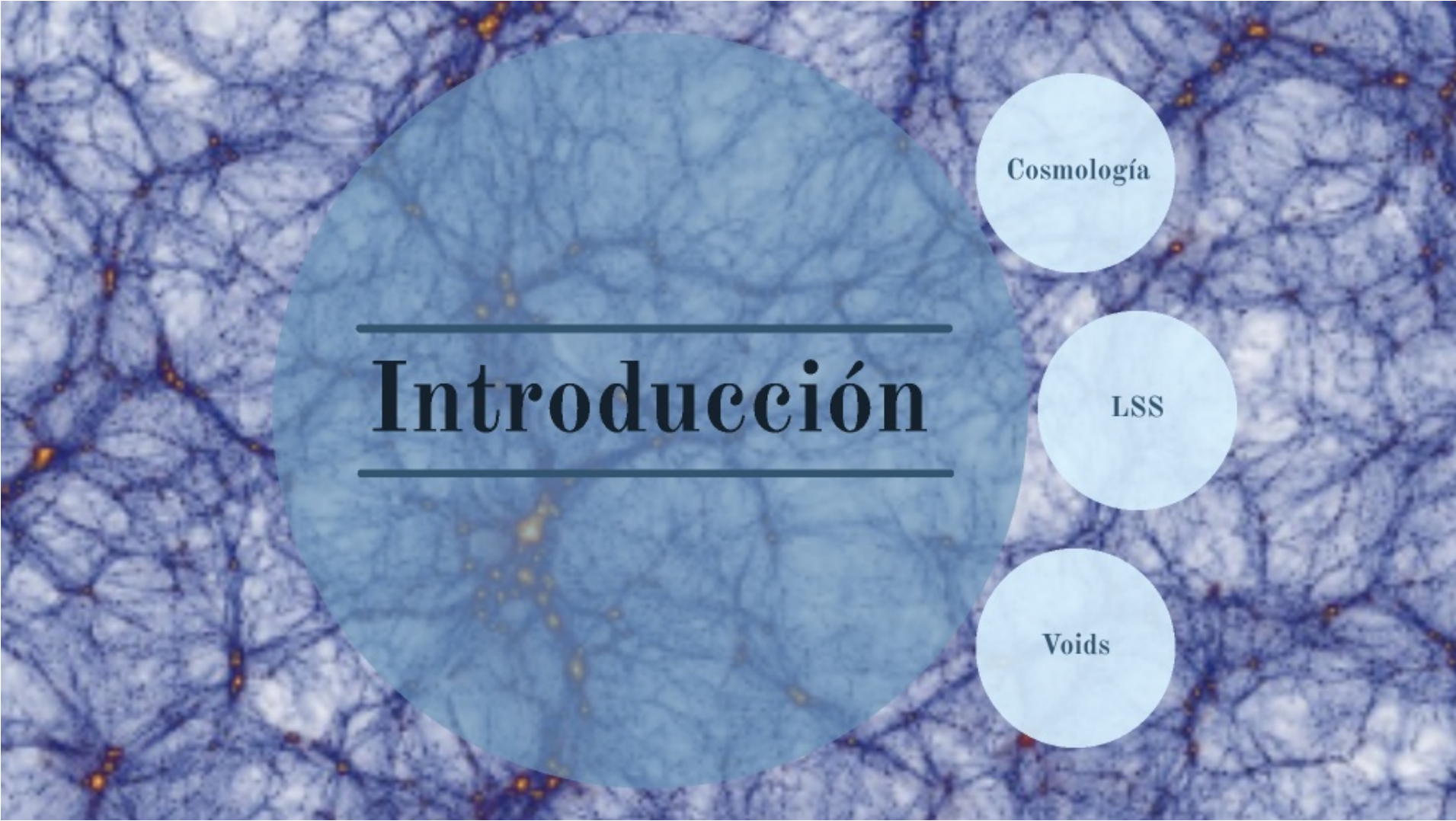
Testeo

Fundamentos

Data set

Modelo

Conclusiones



Introducción

Cosmología

LSS

Voids

Modelo cosmológico estándar

Pilares

Diagrama de Hubble (expansión)

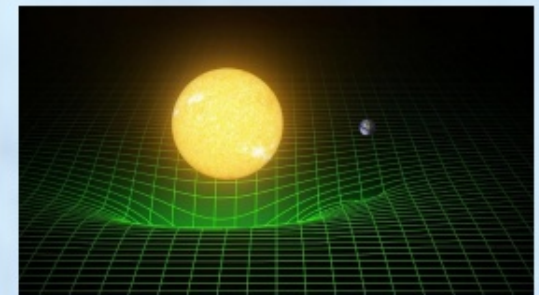
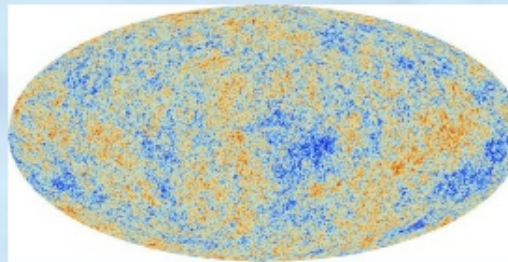
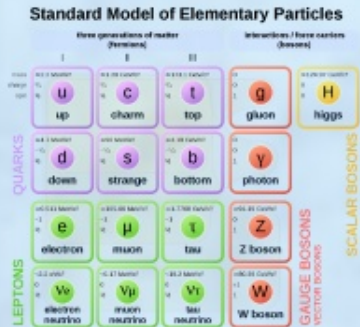
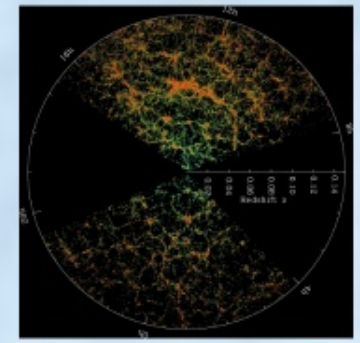
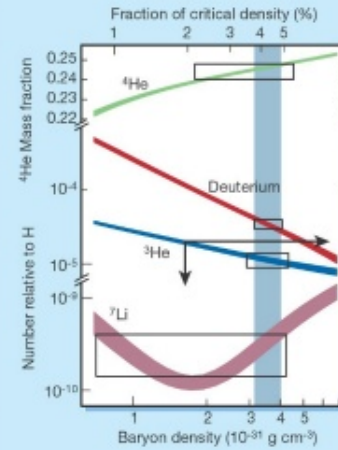
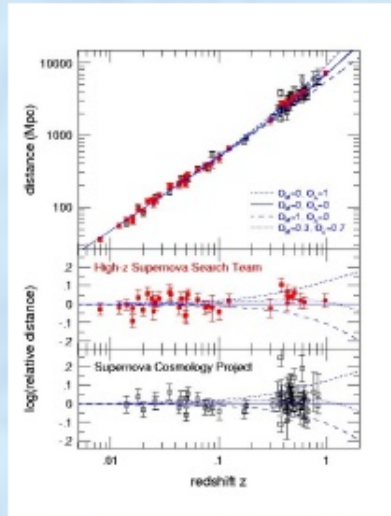
Abundancia de elementos livianos

Fondo Cósmico de Microondas

Estructura en Gran Escala

Relatividad General

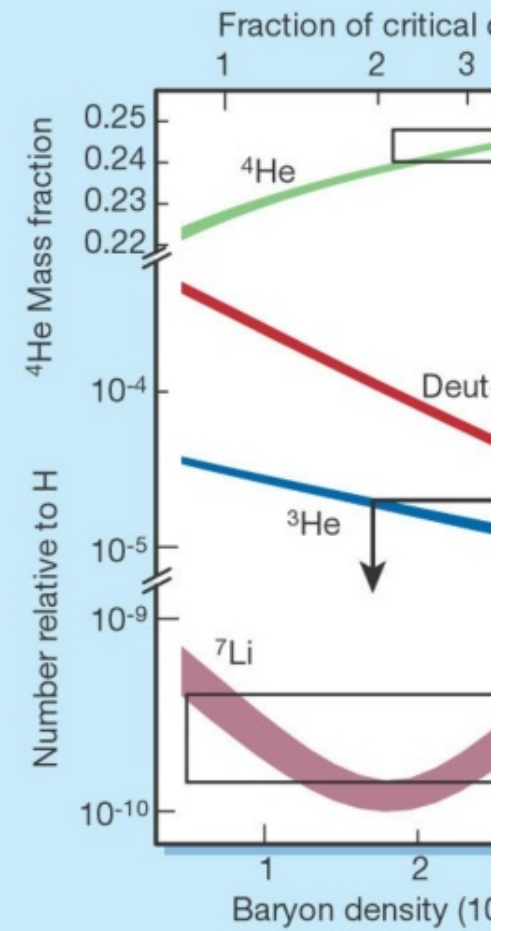
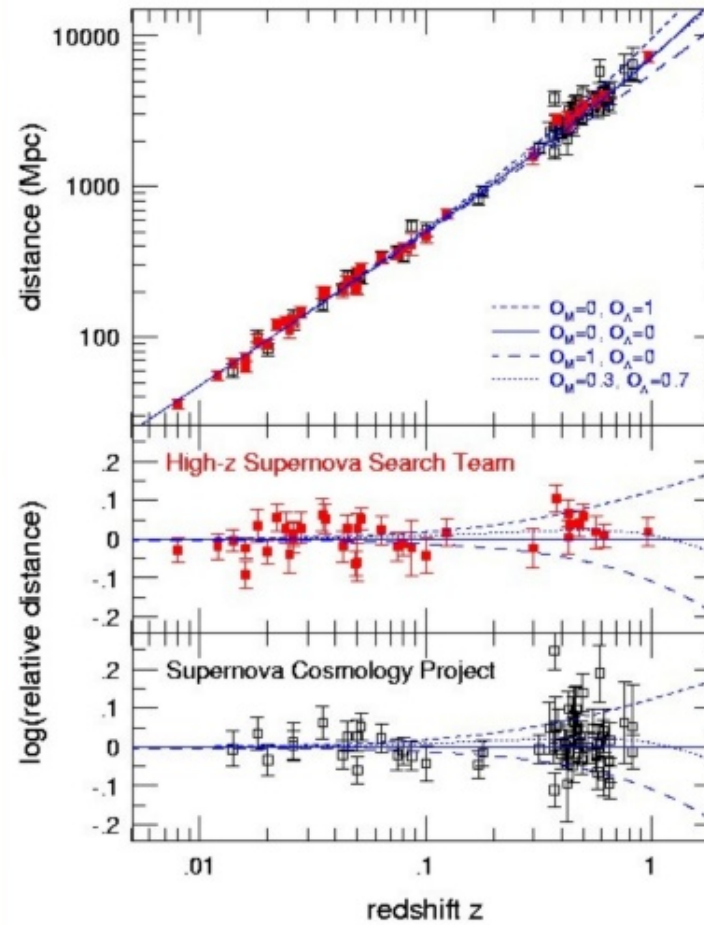
Mecánica Estadística

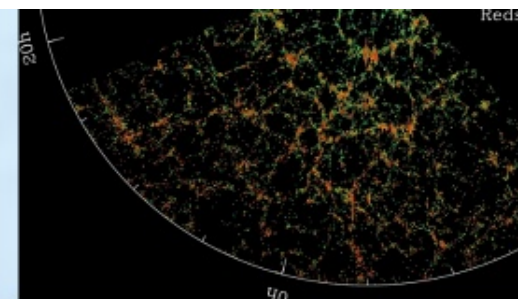
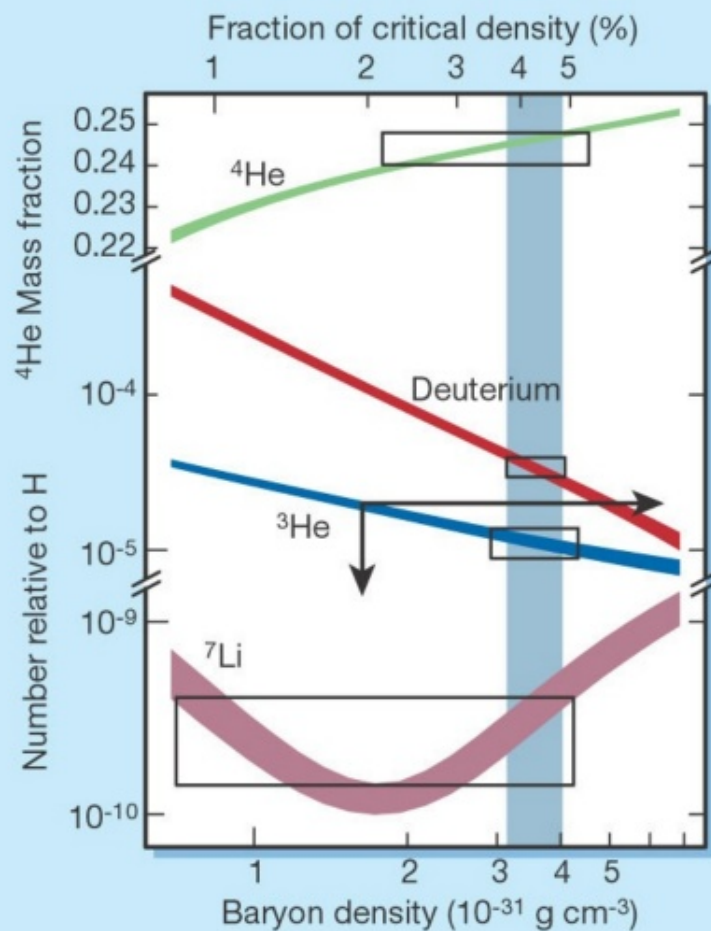
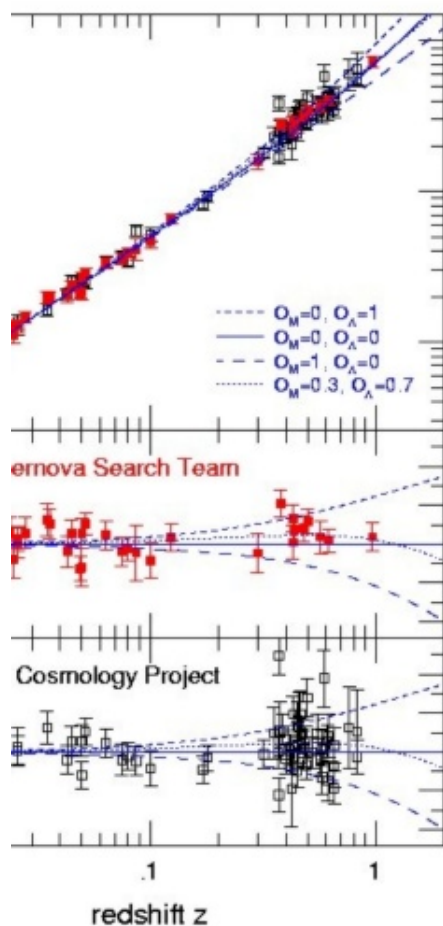


expansión)

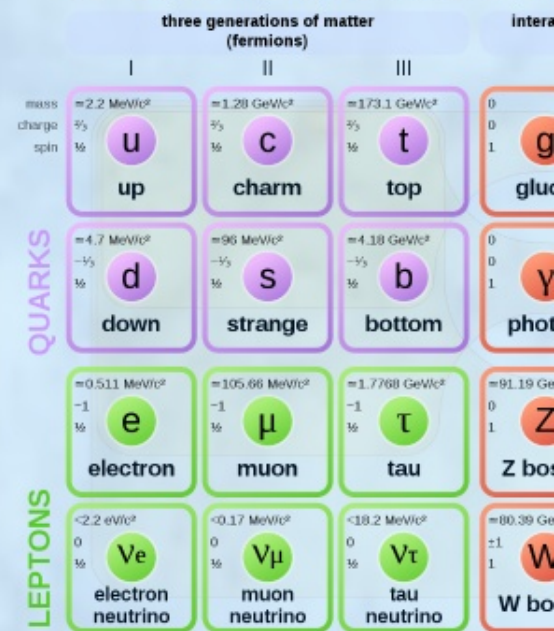
tos livianos

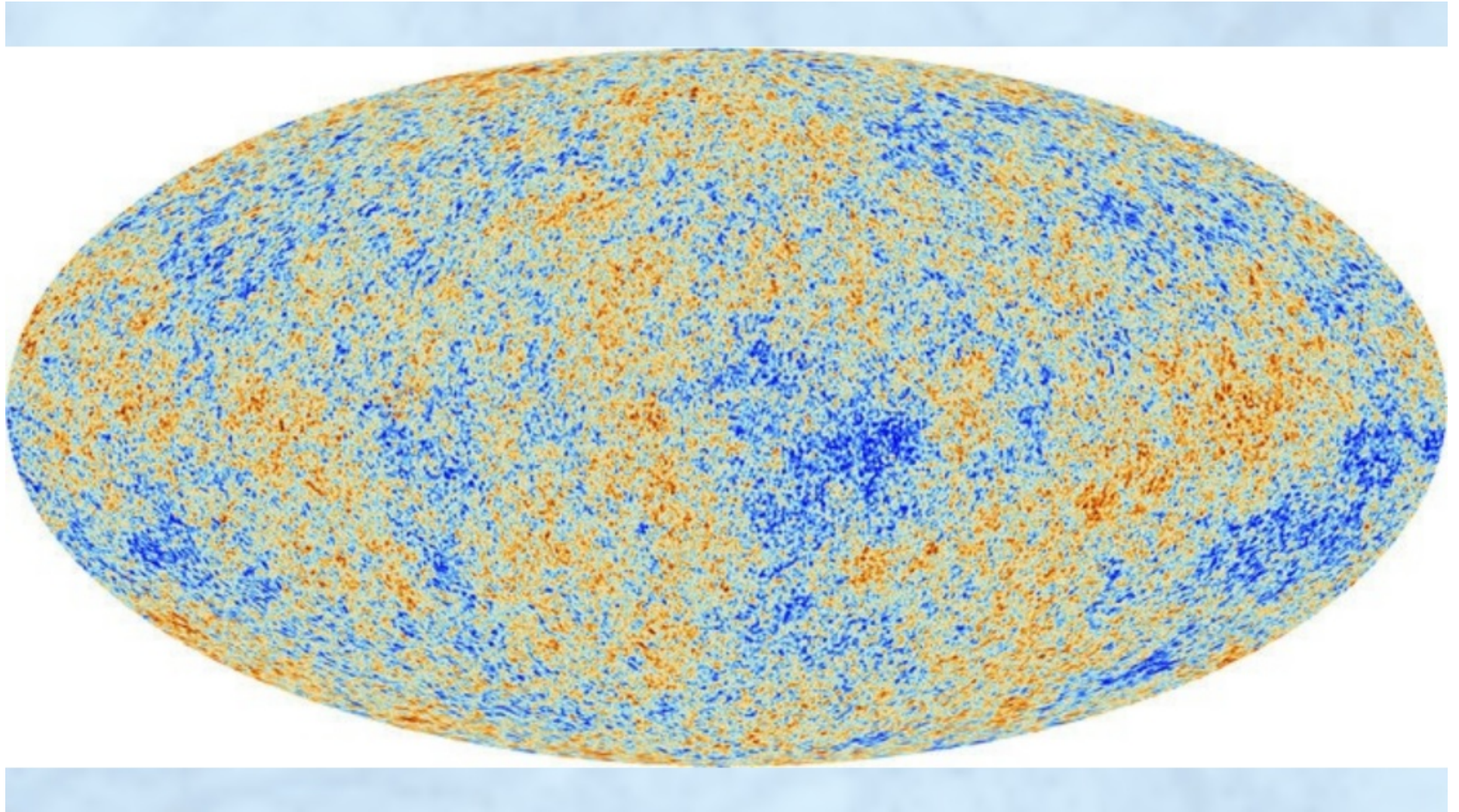
roondas

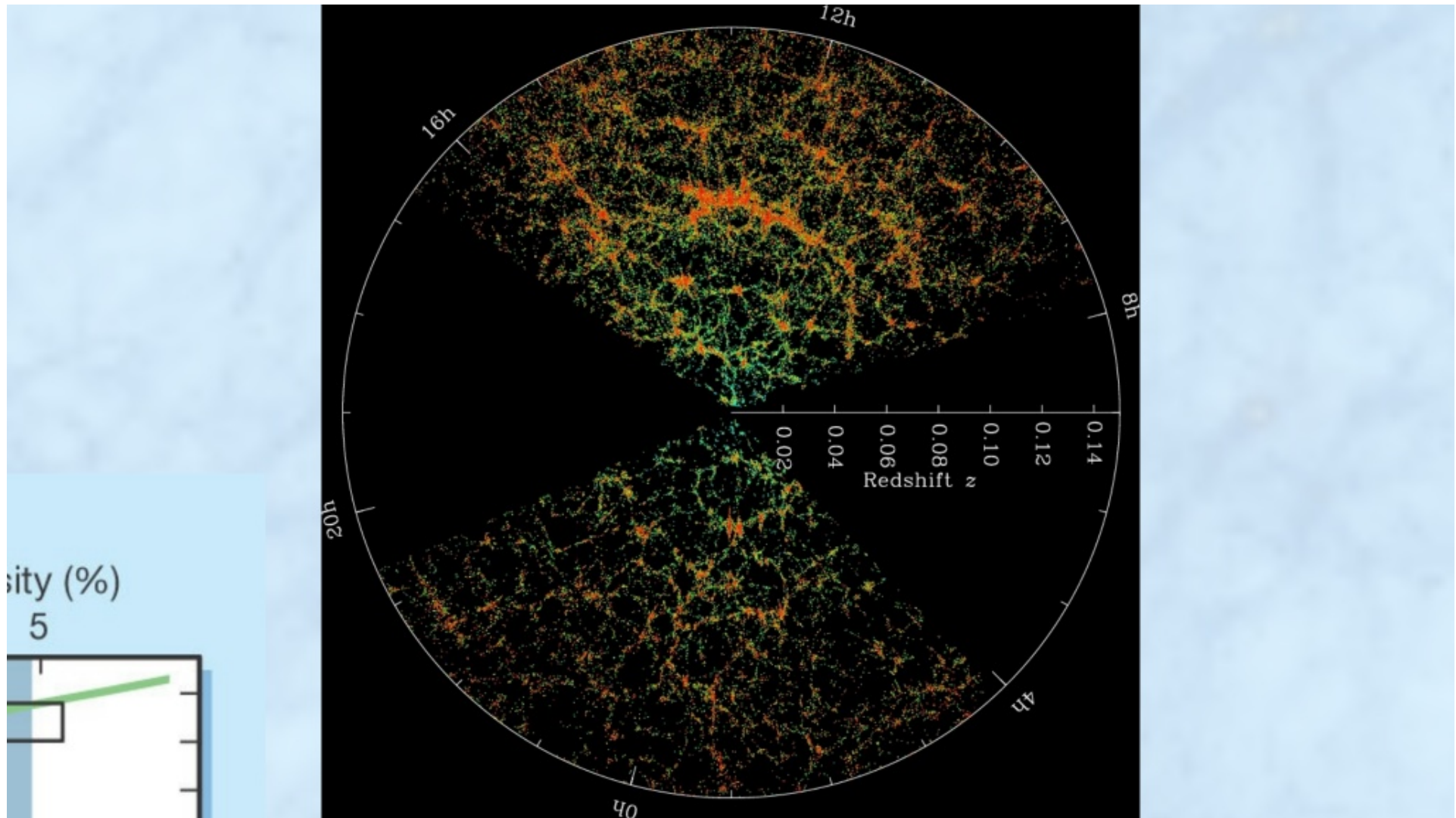


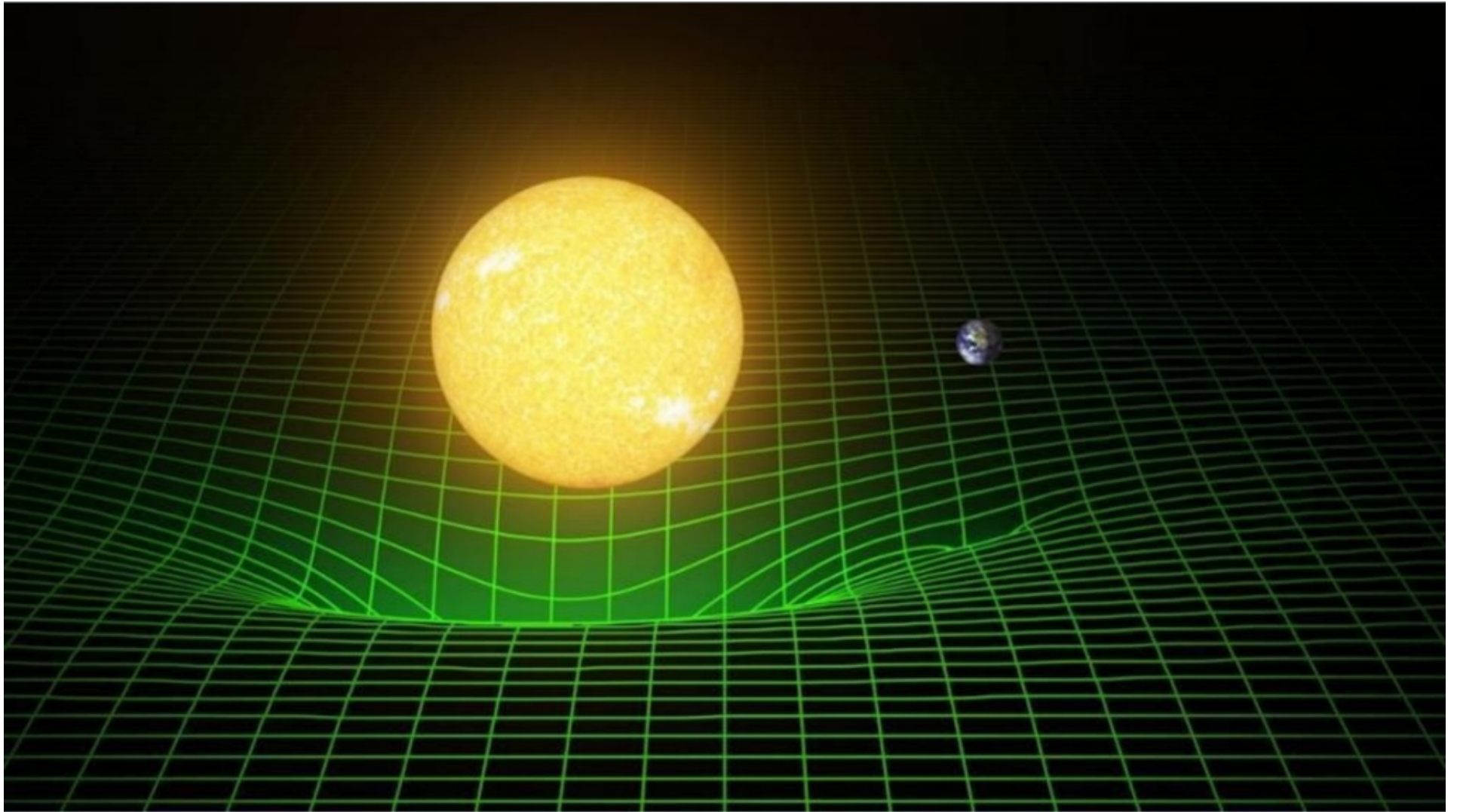


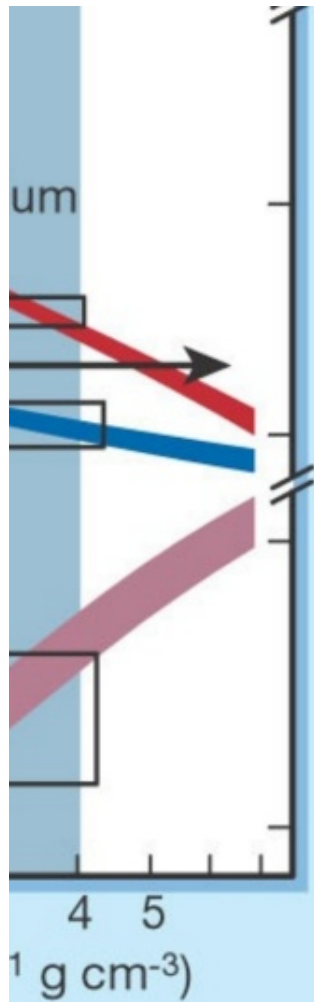
Standard Model of Elementary











Standard Model of Elementary Particles

	three generations of matter (fermions)			interactions / force carriers (bosons)	
	I	II	III		
mass	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$
charge	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
QUARKS	u up	c charm	t top	g gluon	H higgs
	$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	
	d down	s strange	b bottom	γ photon	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
LEPTONS	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$	
	-1	-1	-1	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	e electron	μ muon	τ tau	Z Z boson	
	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$	
	0	0	0	± 1	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson	

GAUGE BOSONS
VECTOR BOSONS

SCALAR BOSONS

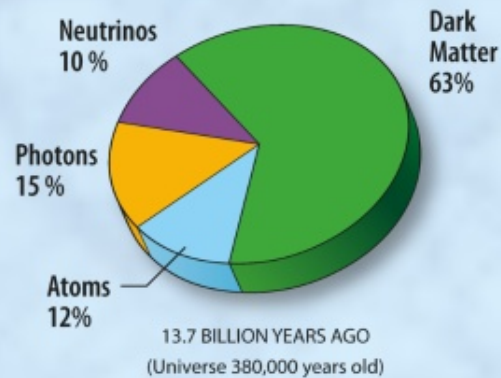
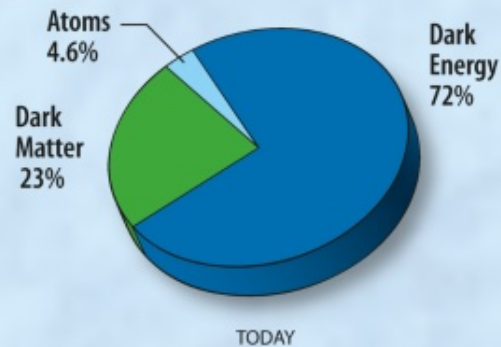
Interrogantes cosmológicos

Desafíos

Materia oscura

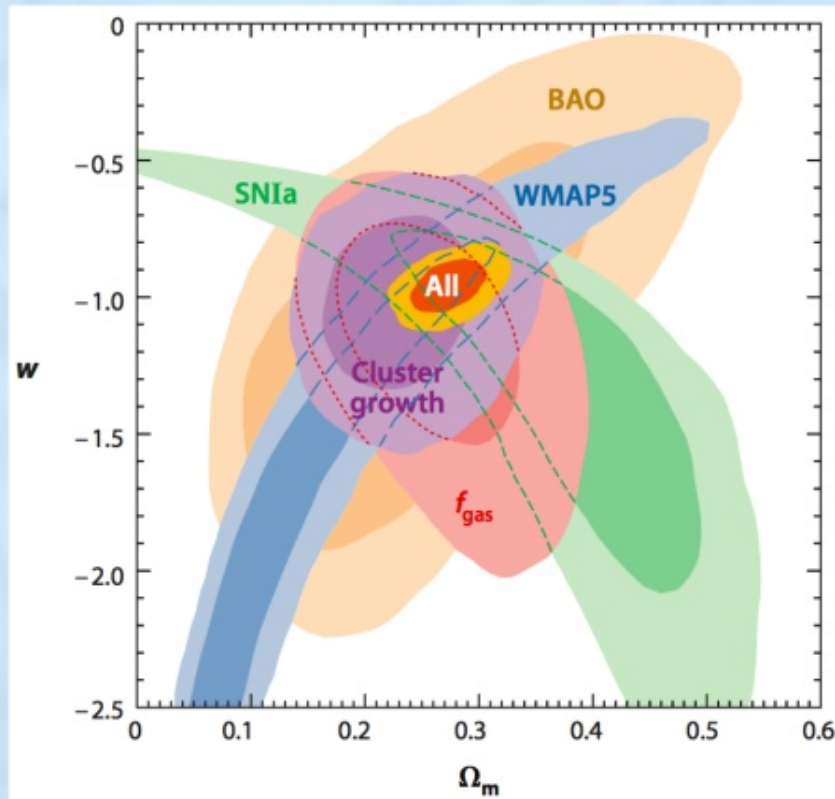
Energía oscura

Inflación



- ¿Geometría?
- ¿Naturaleza?
- ¿Expansión acelerada?
- ¿GR válida para LSS?

Cosmología de precisión



- Métodos estadísticos complementarios
- Simulaciones (calibración de métodos)
- Precisión en la determinación de parámetros cosmológicos
- Discriminar modelos

Allen et al. 2013

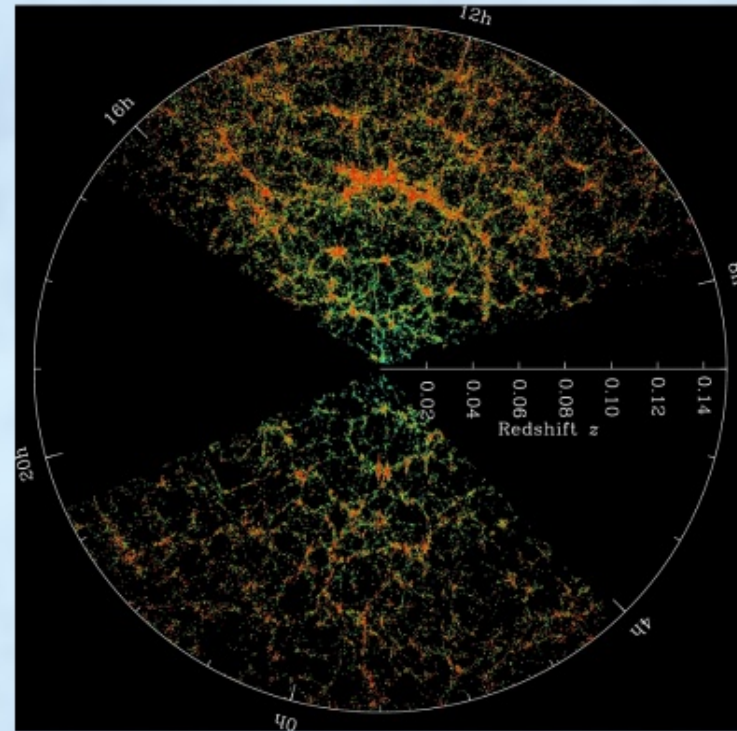
Estructura en gran escala (LSS)

Regiones sobredensas

- Cúmulos de galaxias
- Filamentos
- Paredes

Regiones subdensas

- **Voids**
- 20% densidad media
- Tamaños y formas diversos (depende de los trazadores y el método de identificación)



<https://www.sdss.org/science/orangepie/>

Voids como laboratorios cosmológicos

Ventajas con respecto al régimen sobredenso



**Dinámica
lineal**



**Sensibilidad a
gravedad modificada**

Estadísticos

1

Distribución de tamaños

2

Autocorrelación void-void

3

Correlación cruzada void-galaxia

Voids como laboratorios cosmológicos

Estudios y tests

Test AP

- Esferas estadísticas
- Regla estándar
- **Expansión y geometría**

Estudios RSD

- Velocidades peculiares
- Dinámica lineal (flujos coherentes)
- Fácil modelado
- **Tasa de crecimiento LSS**

Otros

- ISW
- Lentes gravitacionales
- Sunyaev Zeldovich

Índice

Portada

Carlos Mauricio Correa
Director: Dr. Dante Paz
Seminario I de Doctorado
FaMAF - IATE - OAC

Introducción

Mediciones

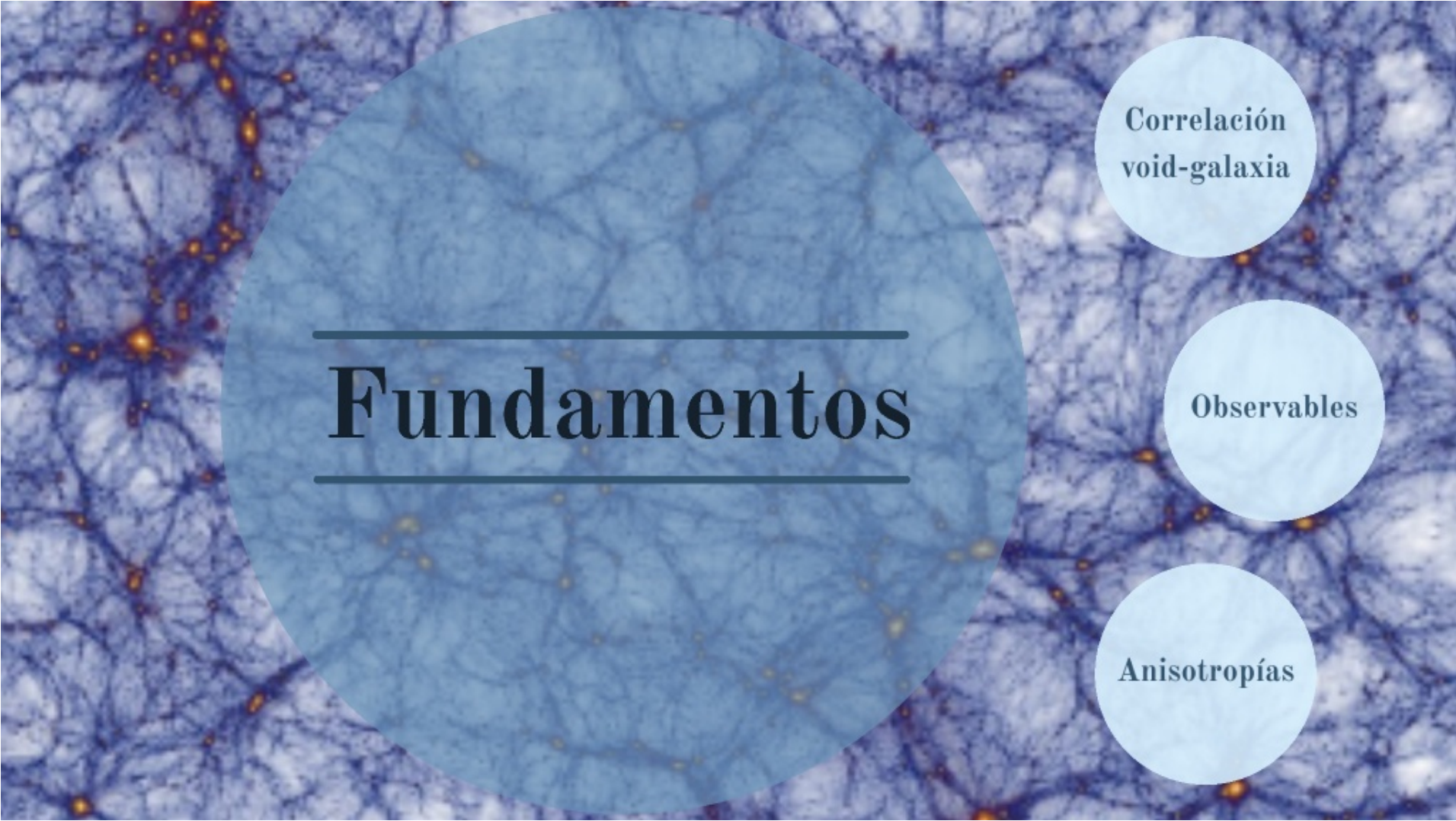
Testeo

Fundamentos

Data set

Modelo

Conclusiones



Fundamentos

Correlación
void-galaxia

Observables

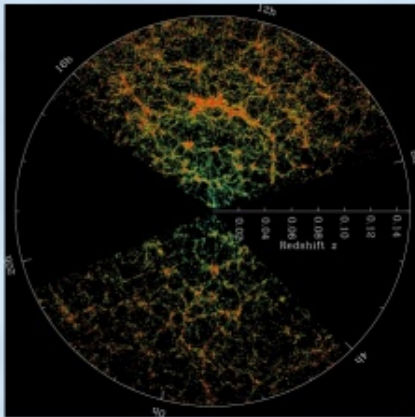
Anisotropías

Correlación void-galaxia

- La función de **correlación void-galaxia** es un estadístico que brinda información acerca del **entorno** (estructura) y **dinámica** de los voids
- Cuantifica el **exceso de probabilidad** de encontrar una galaxia a una determinada distancia r del centro de un void con respecto a una hipotética distribución homogénea de galaxias: $\xi(r)$
- **Observable** fundamental de nuestro test
- **Anisotrópica:**
 - **distorsiones geométricas (GD)**
 - **distorsiones dinámicas (RSD)**
 - **topología del bineado (mezcla de escalas / proyección)**

Observables

- Medición **no fiduciaria**: que no dependa de una **cosmología inicial**
- Medir correlaciones directamente en términos de **distancias angulares (en el plano del cielo)** y **diferencias de redshift (en la dirección de la visual)** entre los pares void-galaxia

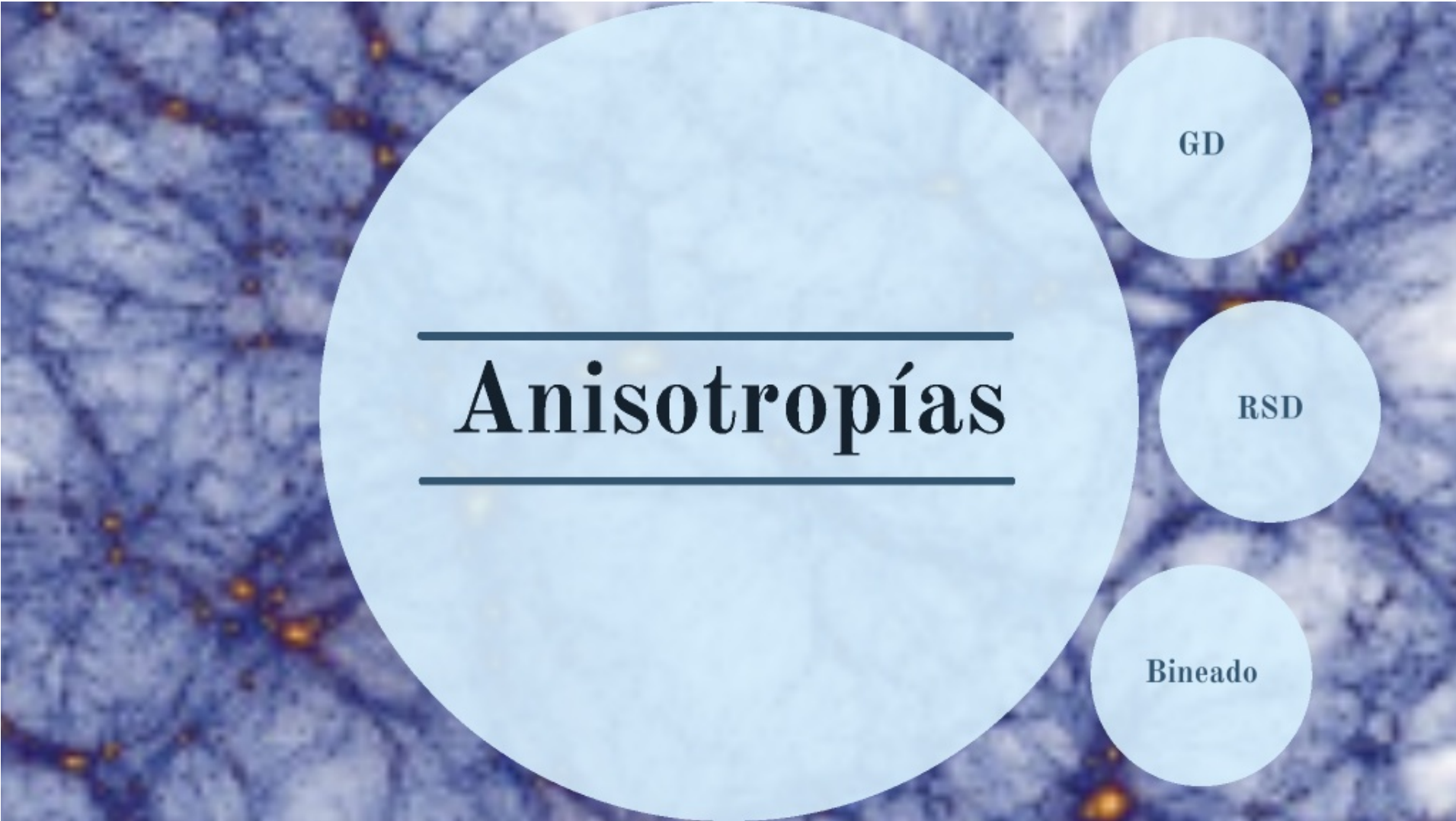


Observables

$$(\theta, \zeta)$$

$$\zeta := |z - z'|$$

- **z**: redshift de la galaxia
- **z'**: redshift del centro del void (provisto por el identificador)



Anisotropías

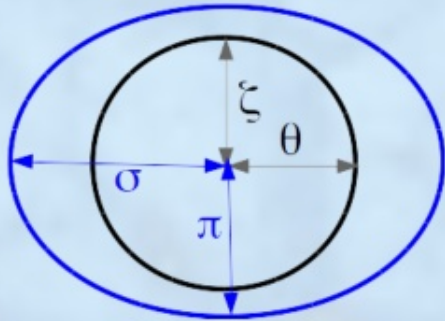
GD

RSD

Bineado

Distorsiones geométricas (GD)

Alcock & Paczynski 1979



Fuente: cosmología fiduciaria

$$\sigma = d_{\text{com}}(z') \theta \quad \pi = |d_{\text{com}}(z) - d_{\text{com}}(z')|$$

$$d_{\text{com}}(z) = c \int_0^z \frac{\hat{z}}{H(\hat{z})}$$

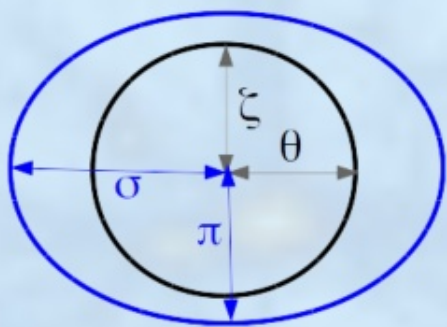
$$H(z) = H_0 \sqrt{\Omega_m (1+z)^3 + \Omega_\Lambda}$$

Sensible: geometría y expansión



Distorsiones dinámicas (**RSD**)

Kaiser 1987



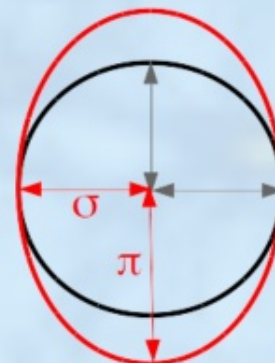
Fuente: cosmología fiduciaria

$$\sigma = d_{\text{com}}(z') \theta \quad \pi = |d_{\text{com}}(z) - d_{\text{com}}(z')|$$

$$d_{\text{com}}(z) = c \int_0^z \frac{\hat{z}}{H(\hat{z})}$$

$$H(z) = H_0 \sqrt{\Omega_m (1+z)^3 + \Omega_\Lambda}$$

Sensible: geometría y expansión



Fuente: velocidades peculiares

$$\sigma = r_\perp \quad \pi = r_\parallel + \frac{v_\parallel}{H(z)} (1+z)$$

$$v(r) = -\frac{1}{3} \frac{H(z)}{(1+z)} \frac{f}{b}(z) r \Delta(r)$$

→ β

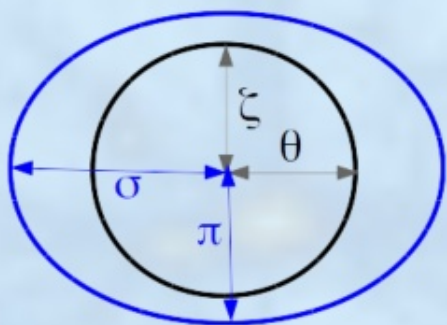
Sensible: crecimiento de LSS



Distorsiones dinámicas (RSD)

Kaiser 1987

La no fiduciaridad de nuestro método permite modelar ambos efectos conjuntamente



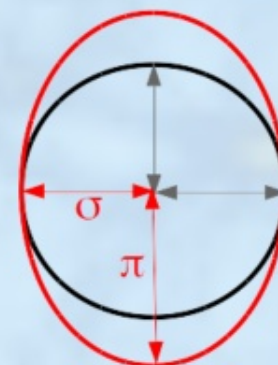
Fuente: cosmología fiduciaria

$$\sigma = d_{\text{com}}(z') \theta \quad \pi = |d_{\text{com}}(z) - d_{\text{com}}(z')|$$

$$d_{\text{com}}(z) = c \int_0^z \frac{\hat{z}}{H(\hat{z})}$$

$$H(z) = H_0 \sqrt{\Omega_m (1+z)^3 + \Omega_\Lambda}$$

Sensible: geometría y expansión



Fuente: velocidades peculiares

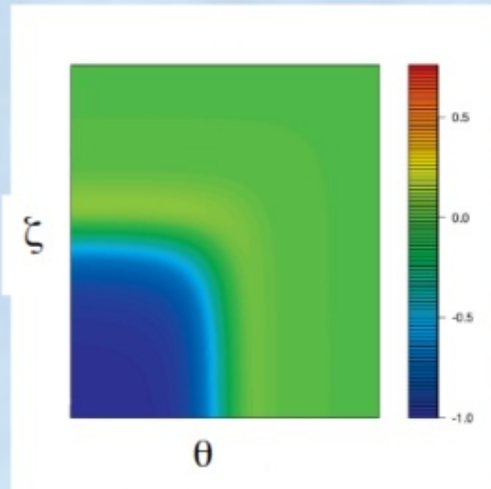
$$\sigma = r_\perp \quad \pi = r_\parallel + \frac{v_\parallel}{H(z)} (1+z)$$

$$v(r) = -\frac{1}{3} \frac{H(z)}{(1+z)} \frac{f}{b}(z) r \Delta(r)$$

Sensible: crecimiento de LSS

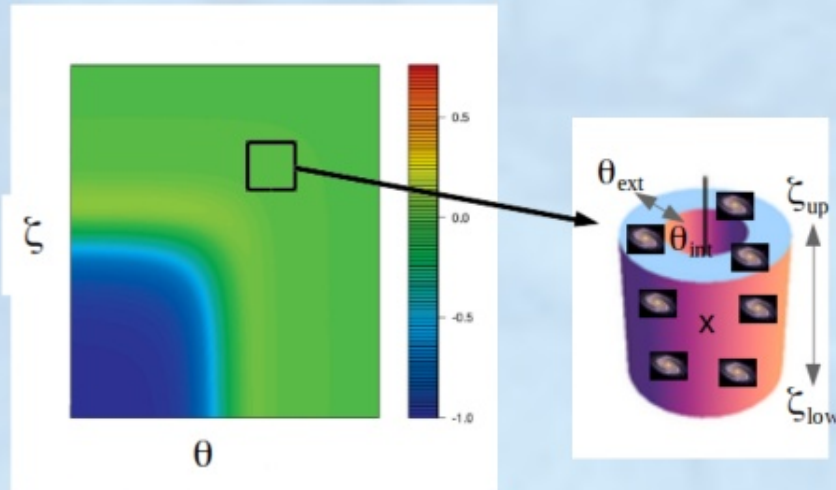


Bineado y proyección



Aproximación de
observador lejano

Bineado y proyección



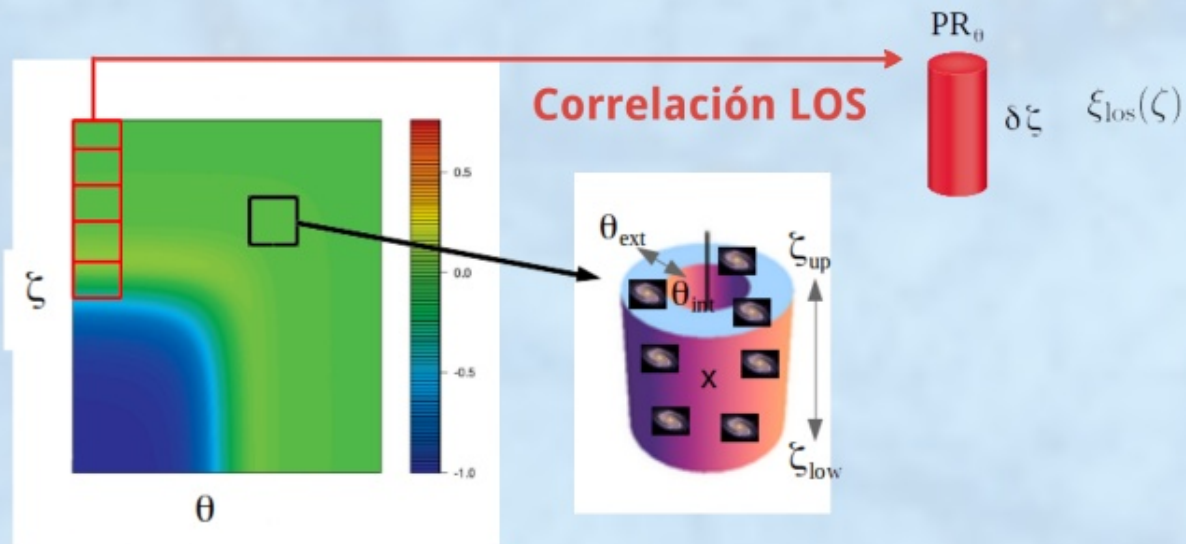
$$\xi_{\text{bin}}(\theta, \zeta) = \frac{DD}{DR} - 1$$

Bineado con
geometría cilíndrica



Aproximación de
observador lejano

Bineado y proyección



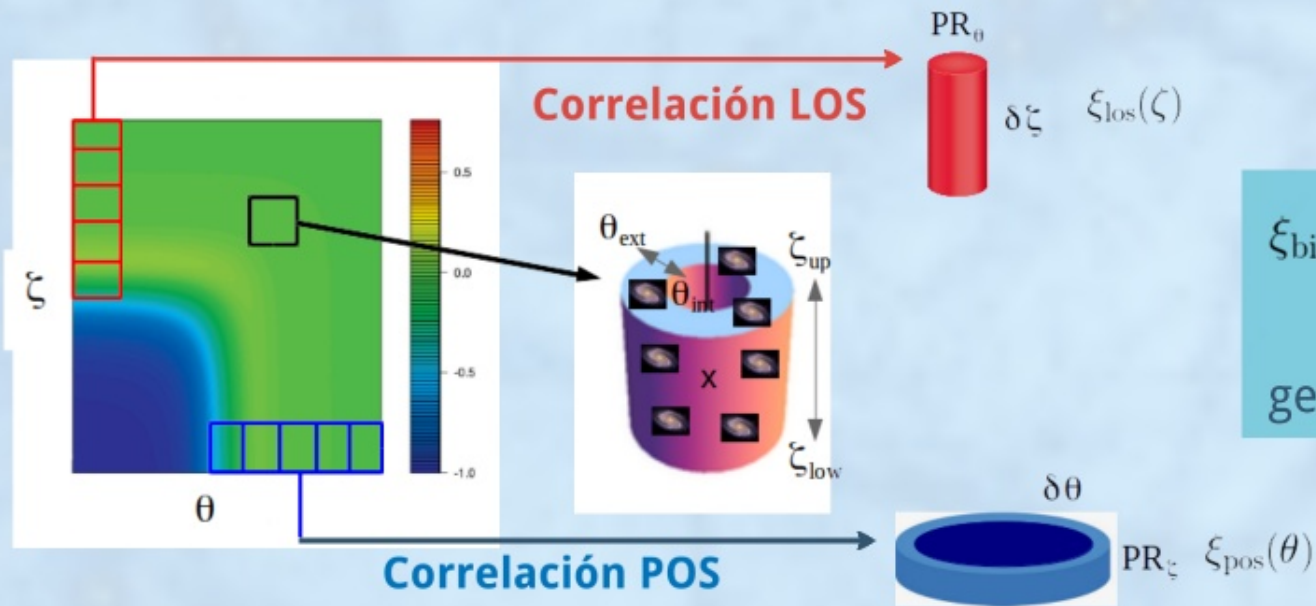
$$\xi_{\text{bin}}(\theta, \zeta) = \frac{DD}{DR} - 1$$

Bineado con geometría cilíndrica



Aproximación de observador lejano

Bineado y proyección



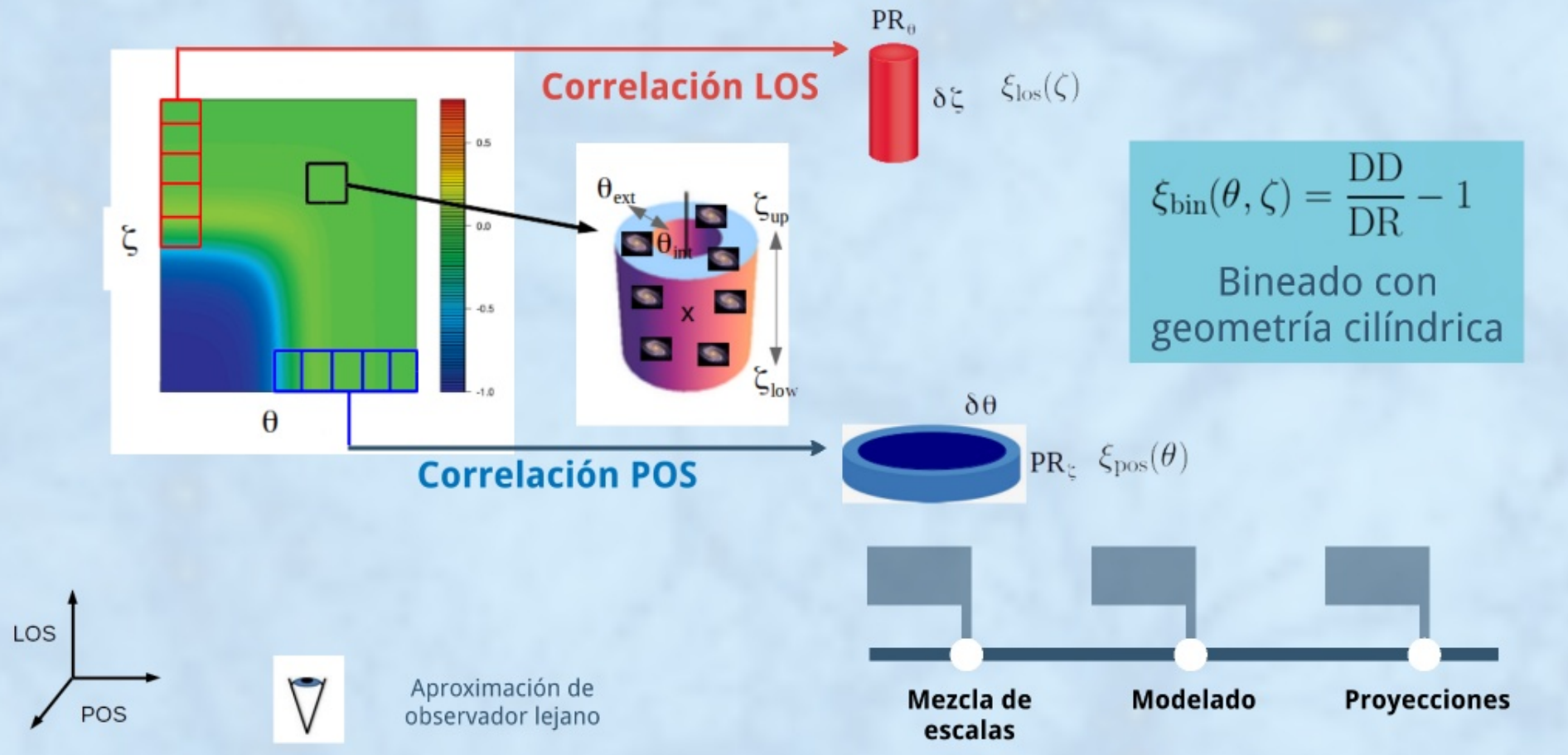
$$\xi_{\text{bin}}(\theta, \zeta) = \frac{DD}{DR} - 1$$

Bineado con geometría cilíndrica



Aproximación de observador lejano

Bineado y proyección



Índice

Portada

Carlos Mauricio Correa
Director: Dr. Dante Paz
Seminario I de Doctorado
FaMAF - IATE - OAC

Introducción

Mediciones

Testeo

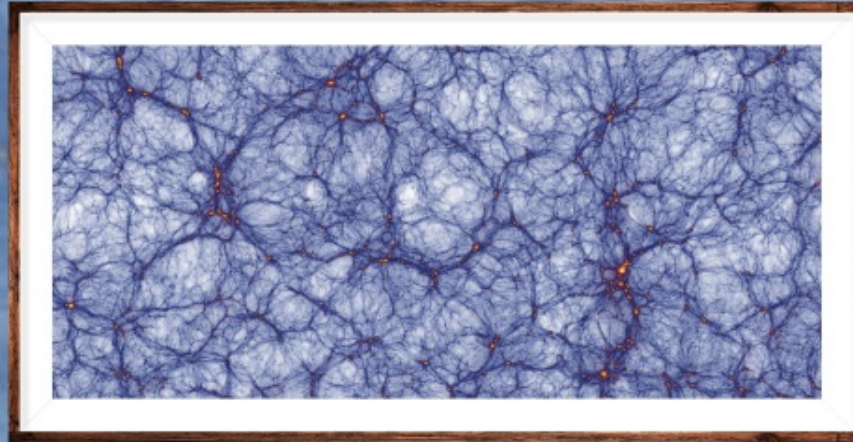
Fundamentos

Data set

Modelo

Conclusiones

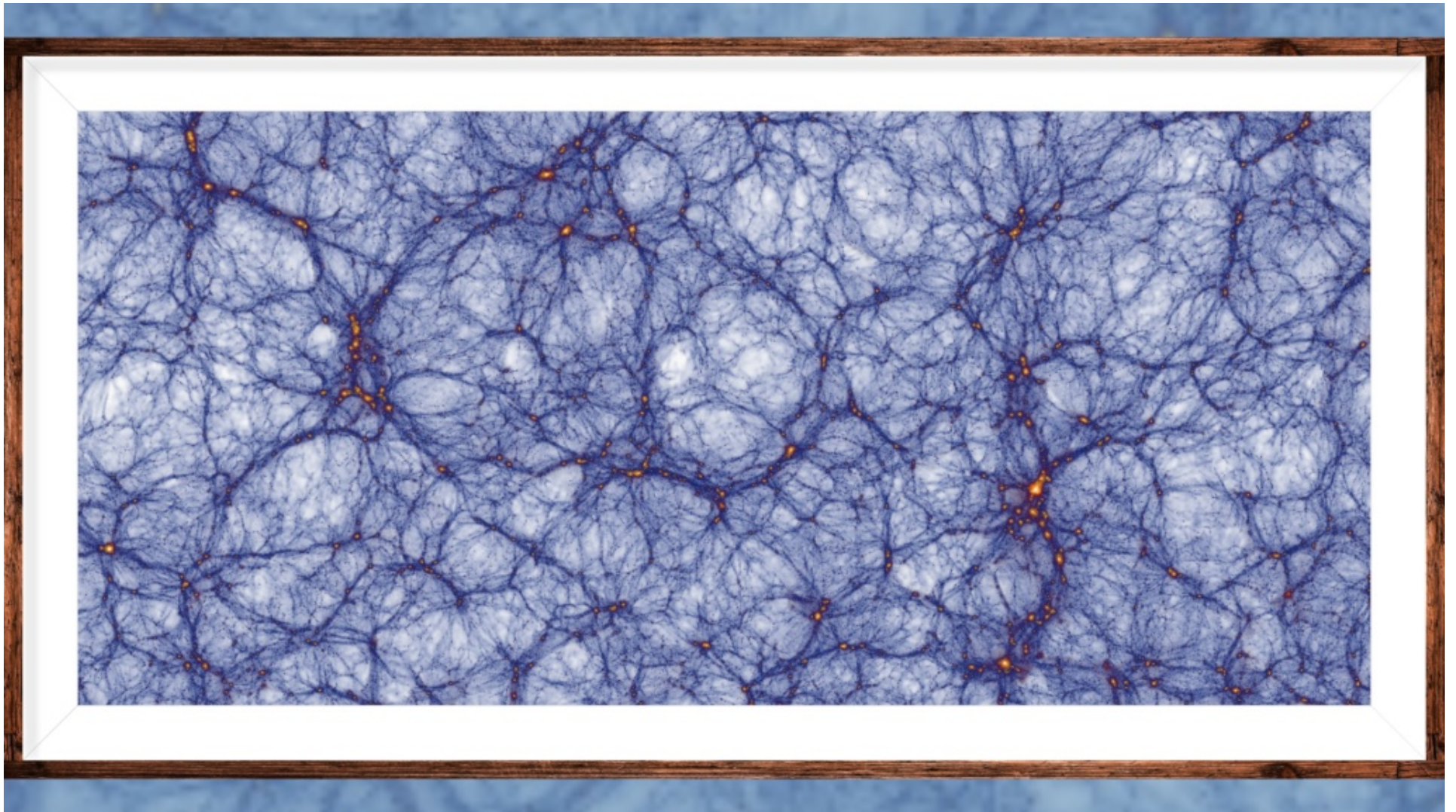
Data set



MXXL (Angulo et al. 2012)

Simulación

Voids



Simulación Millennium XXL

Angulo et al. 2012

Materia Oscura

Tamaño: 3 Gpc h^{-1}

Resolución: 6720³

Trazadores: halos

Snapshots: 0.5; 1; 1.5

Impacto

Cosmología

$$\begin{cases} \Omega_m = 0.25 \\ \Omega_\Lambda = 0.75 \\ h = 0.73 \end{cases}$$

$$M_h \geq 5 \times 10^{11} M_\odot h^{-1}$$

Simulación Millennium XXL

Angulo et al. 2012

Materia Oscura

Tamaño: 3 Gpc h^{-1}

Resolución: 6720³

Trazadores: halos

Snapshots: 0.5; 1; 1.5

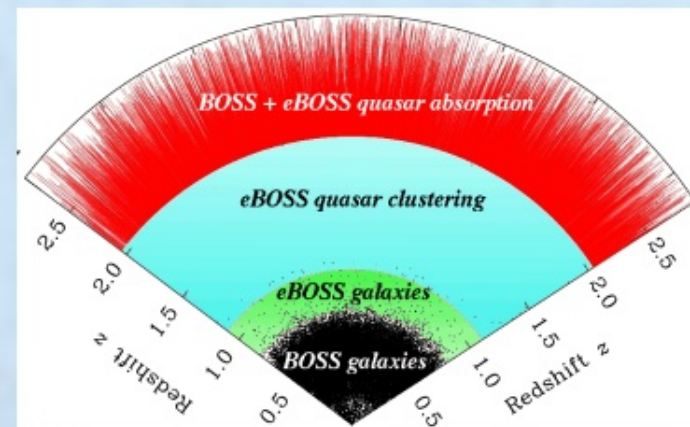
Impacto



Cosmología

$$\begin{cases} \Omega_m = 0.25 \\ \Omega_\Lambda = 0.75 \\ h = 0.73 \end{cases}$$

$$M_h \geq 5 \times 10^{11} M_\odot h^{-1}$$



Identificación de voids

Ruiz et al. (2015)

Esférico

Teselación de Voronoi

Candidatos

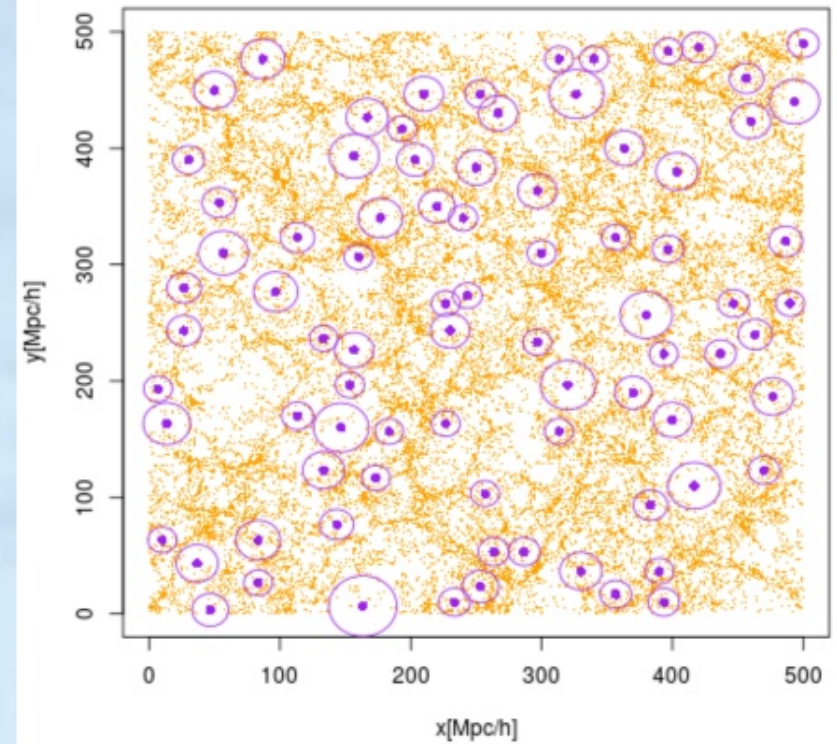
Crecimiento de esferas

Filtrado de solapamiento

Real space

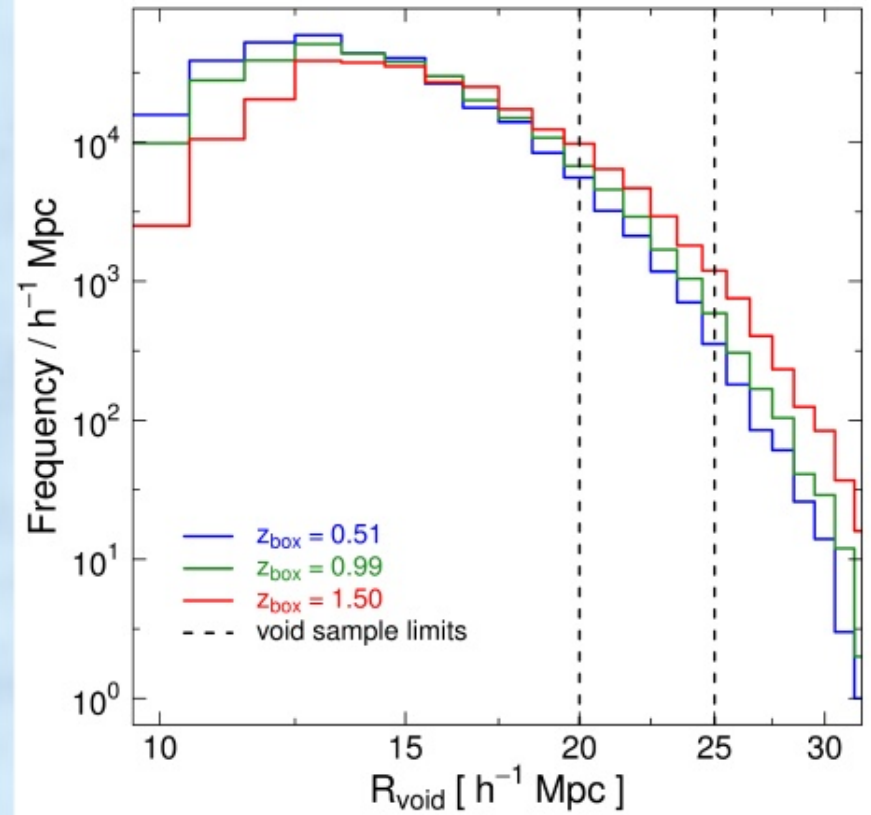
$$\Delta(R_{\text{void}}) < \Delta_{\text{cut}}^{\text{id}}(z)$$

$$\Delta_{\text{cut}}^{\text{id}}(z=0) = -0.9$$



Muestras de voids

z_{box}	Halo	$\Delta_{\text{cut}}^{\text{id}}$	Voids
0.51	136993439	-0.8764	333741
0.99	133688808	-0.8533	305082
1.50	118244901	-0.8302	254993



Correa et al. 2019

Índice

Portada

Carlos Mauricio Correa
Director: Dr. Dante Paz
Seminario I de Doctorado
FaMAF - IATE - OAC

Introducción

Mediciones

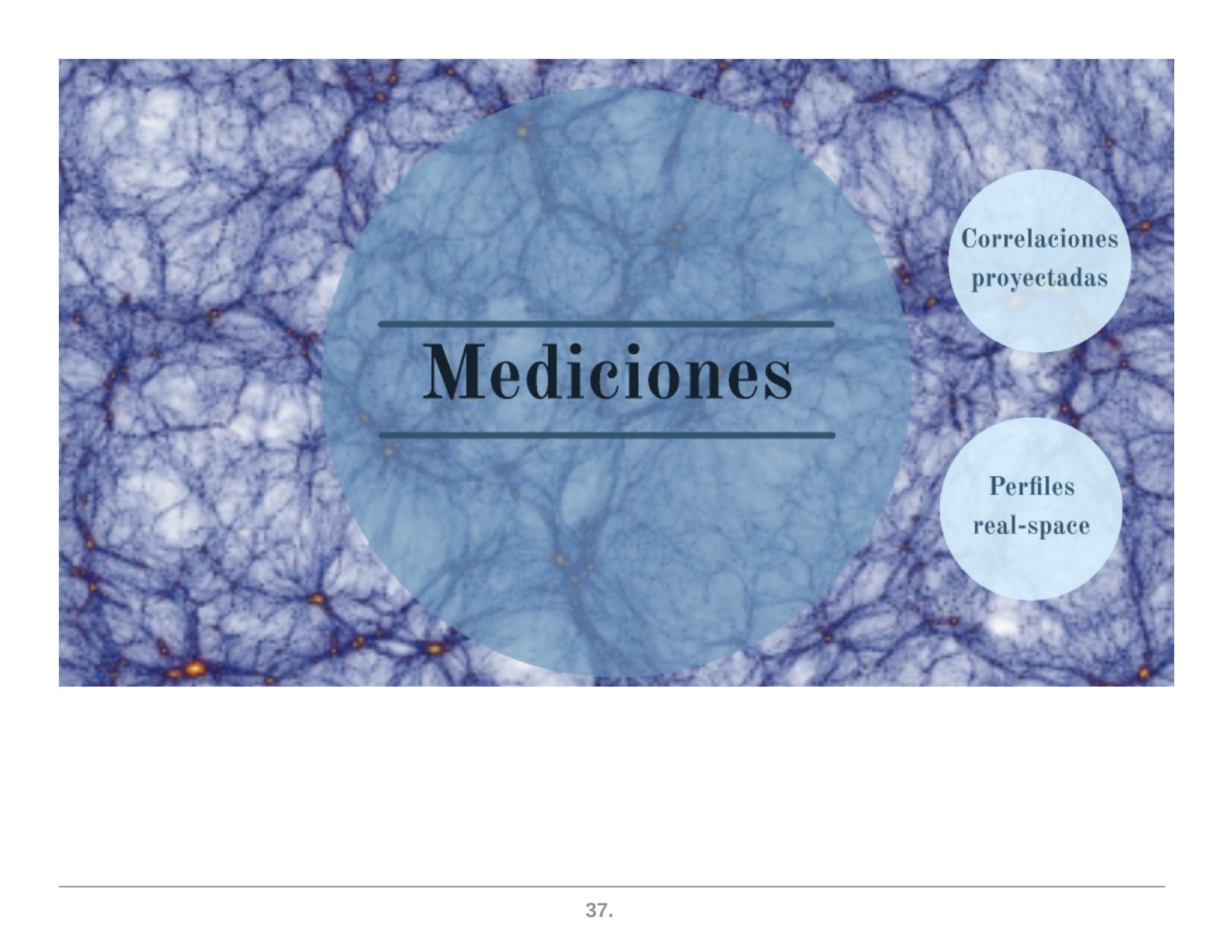
Testeo

Fundamentos

Data set

Modelo

Conclusiones

The background of the slide is a map of the Cosmic Microwave Background (CMB) fluctuations, showing a complex pattern of blue and white regions with small orange and red spots. A large, semi-transparent blue circle is centered on the slide, containing the title. To the right of this circle are two smaller, light blue circles, each containing text. The entire slide is framed by a thin black border.

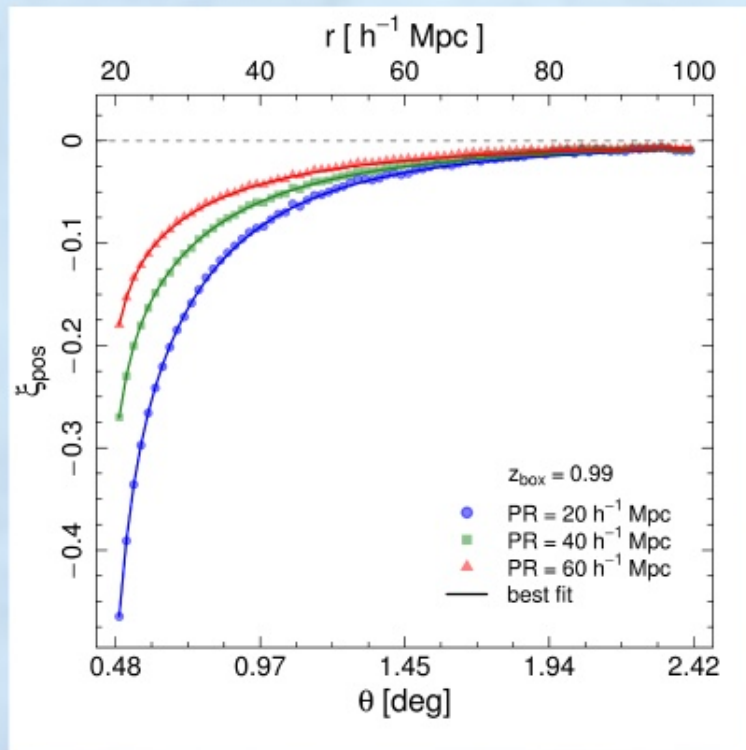
Mediciones

**Correlaciones
proyectadas**

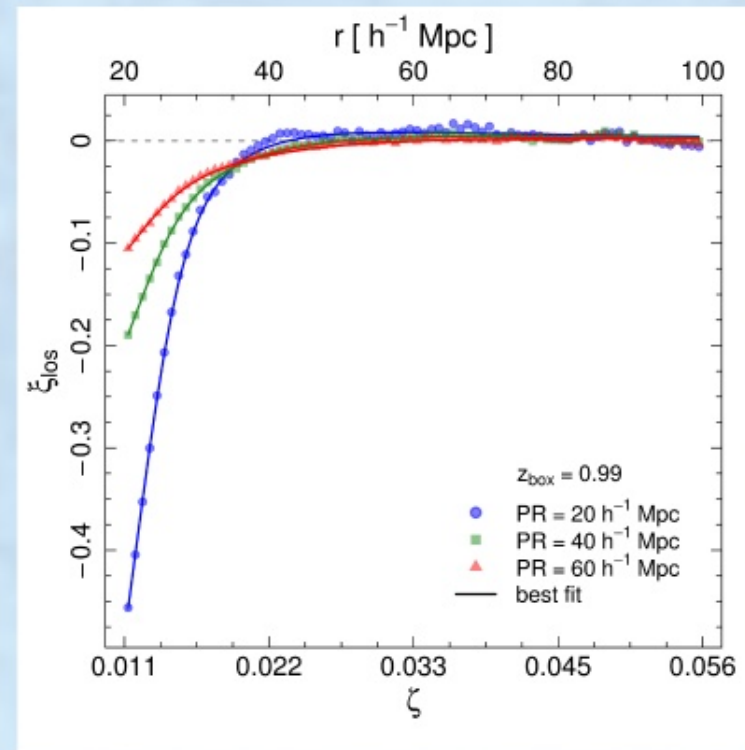
**Perfiles
real-space**

Correlaciones proyectadas

Correa et al. 2019



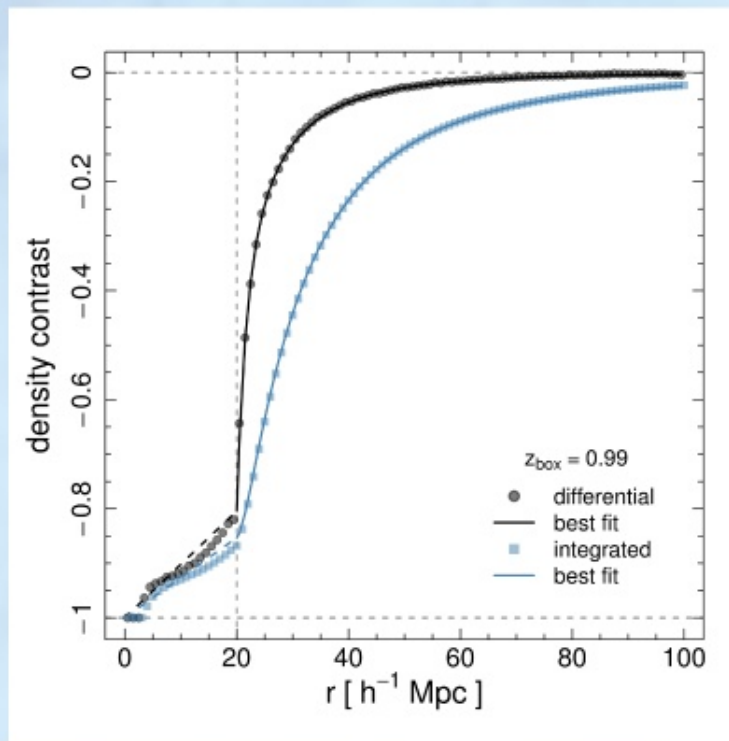
Correlación POS: proyección hacia el plano del cielo en un dado rango de redshift (PR)



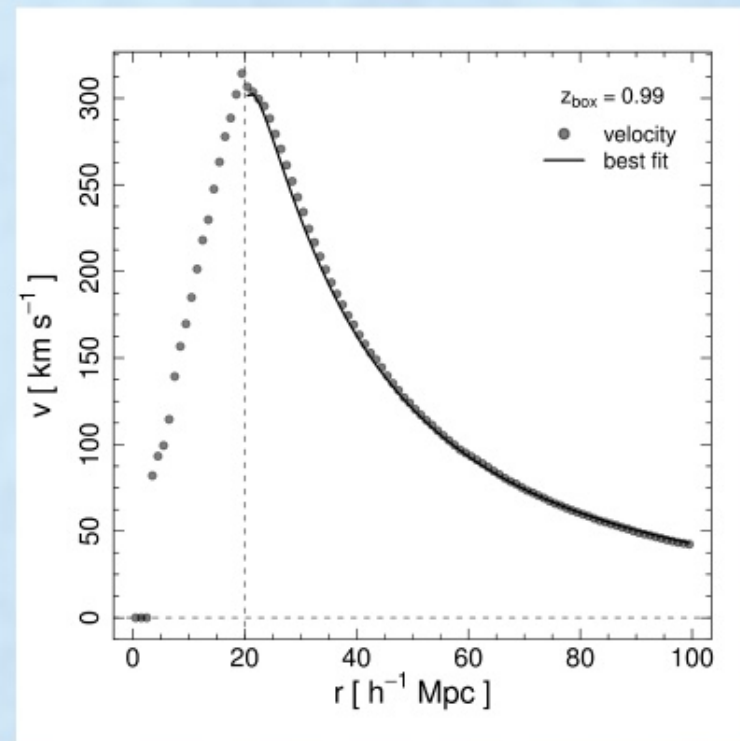
Correlación LOS: proyección hacia la línea de la visual en un dado rango angular (PR)

Perfiles real-space

Correa et al. 2019



Densidad



Velocidad

Índice

Portada

Carlos Mauricio Correa
Director: Dr. Dante Paz
Seminario I de Doctorado
FaMAF - IATE - OAC

Introducción

Mediciones

Testeo

Fundamentos

Data set

Modelo

Conclusiones

Modelo

- Bineado cilíndrico arbitrario
- Correlaciones proyectadas constituyen un caso particular

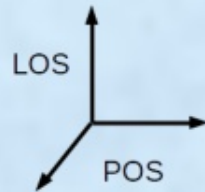
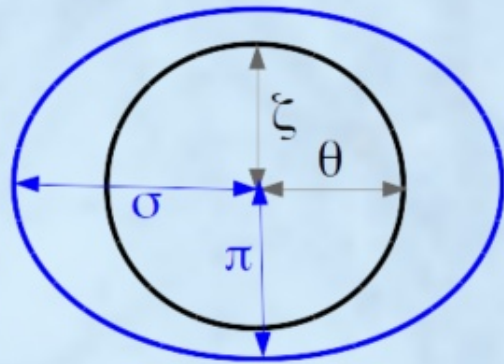
$$\{\Omega_m, \beta, \sigma_v, \xi_0, r_0, \alpha\}$$

GD

Bineado

RSD

Distorsiones geométricas (GD)



$$\sigma = d_{\text{com}}(z') \theta \quad \pi = |d_{\text{com}}(z) - d_{\text{com}}(z')|$$

$$d_{\text{com}}(z) = c \int_0^z \frac{\hat{z}}{H(\hat{z})}$$

$$H(z) = H_0 \sqrt{\Omega_m (1+z)^3 + \Omega_\Lambda}$$



fijo



$$\Omega_\Lambda = 1 - \Omega_m$$

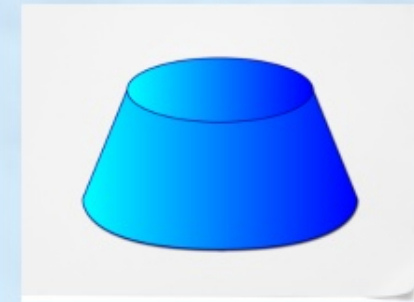
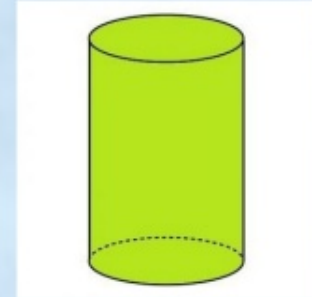
Bineado

$$\xi_{\text{bin}}(\theta, \zeta) = \frac{\text{DD}}{\text{DR}} - 1$$

$$\begin{aligned} \text{DD} = & 2 \hat{\pi} \int_{z'_{\min}}^{z'_{\max}} dz' d_{\text{com}}^2(z') n_v(z') V_{\text{slice}} \\ & \left[\int_{z'+\zeta_{\text{low}}}^{z'+\zeta_{\text{up}}} dz \frac{dd_{\text{com}}}{dz}(z) n_t(z) \int_{\theta_{\text{int}}}^{\theta_{\text{ext}}} d\theta \theta [1 + \xi(\sigma, \pi)] + \right. \\ & \left. \int_{z'-\zeta_{\text{up}}}^{z'-\zeta_{\text{low}}} dz \frac{dd_{\text{com}}}{dz}(z) n_t(z) \int_{\theta_{\text{int}}}^{\theta_{\text{ext}}} d\theta \theta [1 + \xi(\sigma, \pi)] \right], \end{aligned}$$

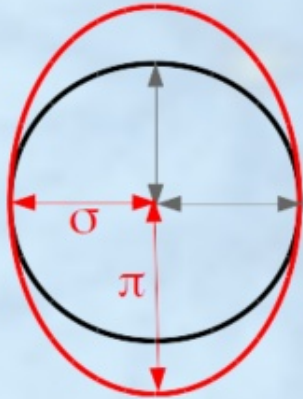
$$\begin{aligned} \text{DR} = & \hat{\pi} \left(\theta_{\text{ext}}^2 - \theta_{\text{int}}^2 \right) \int_{z'_{\min}}^{z'_{\max}} dz' d_{\text{com}}^2(z') n_v(z') V_{\text{slice}} \\ & \left[\int_{z'+\zeta_{\text{low}}}^{z'+\zeta_{\text{up}}} dz \frac{dd_{\text{com}}}{dz}(z) n_t(z) + \int_{z'-\zeta_{\text{up}}}^{z'-\zeta_{\text{low}}} dz \frac{dd_{\text{com}}}{dz}(z) n_t(z) \right] \end{aligned}$$

espacio de
observables



espacio
distorsionado

Distorsiones dinámicas (RSD)

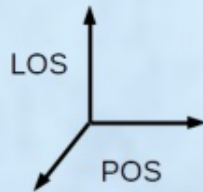


$$1 + \xi(\sigma, \pi) = \int_{-\infty}^{\infty} [1 + \xi(r)] \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_v} \exp \left[-\frac{(v_{\parallel} - v(r)\frac{r_{\parallel}}{r})^2}{2\sigma_v^2} \right] dv_{\parallel}$$

Peebles 1979

Paz et al. 2013

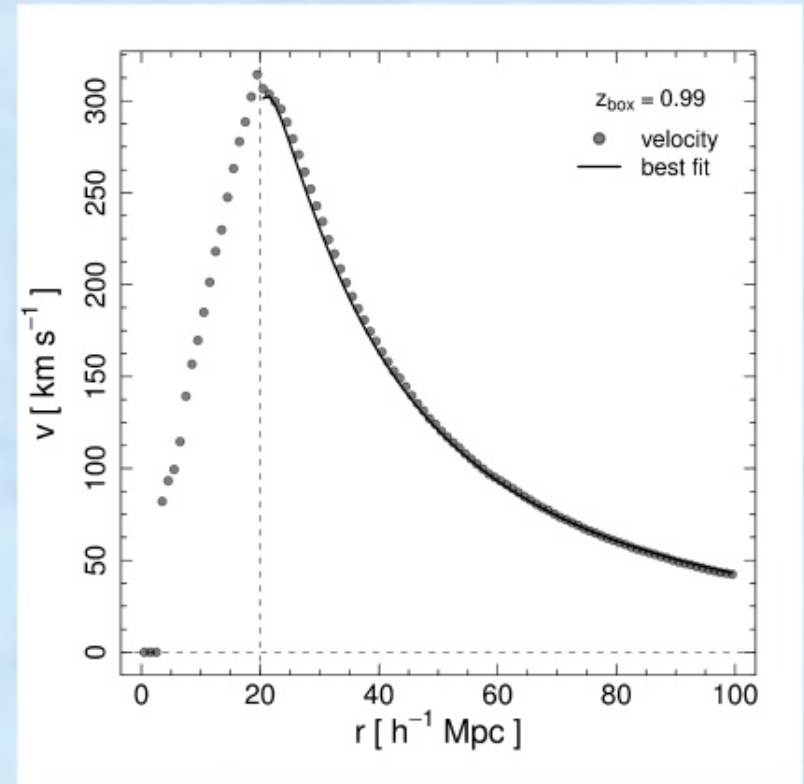
Hamaus et al. 2015, 2016



Velocidad

Correa et al. 2019

$$v(r) = -\frac{1}{3} \frac{H(z)}{(1+z)} \beta(z) r \Delta(r),$$



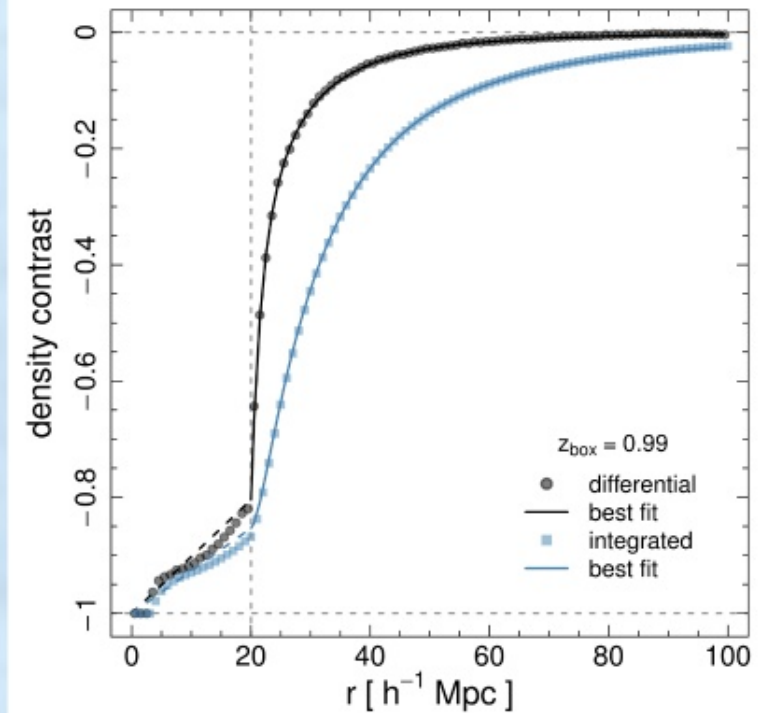
Densidad

$$\xi(r) = \delta(r)$$

$$\xi(r) = \begin{cases} Ar - 1 & \text{if } r < r_{\text{cut}}, \\ -\xi_0 \left[\left(\frac{r}{r_0} \right)^{-3} + \left(\frac{r}{r_0} \right)^{-\alpha} \right] & \text{if } r \geq r_{\text{cut}}, \end{cases}$$

$$\Delta(r) := \frac{1}{V} \int_V \delta(r) dV$$

$$\Delta(r) = \begin{cases} \frac{3}{4}Ar - 1 & \text{if } r < r_{\text{cut}}, \\ \frac{3}{r^3} \left[\frac{ar^4}{4} - \frac{r_{\text{cut}}}{3} + I(r) - I(r_{\text{cut}}) \right] & \text{if } r \geq r_{\text{cut}}, \end{cases}$$



Correa et al. 2019

Índice

Portada

Carlos Mauricio Correa
Director: Dr. Dante Paz
Seminario I de Doctorado
FaMAF - IATE - OAC

Introducción

Mediciones

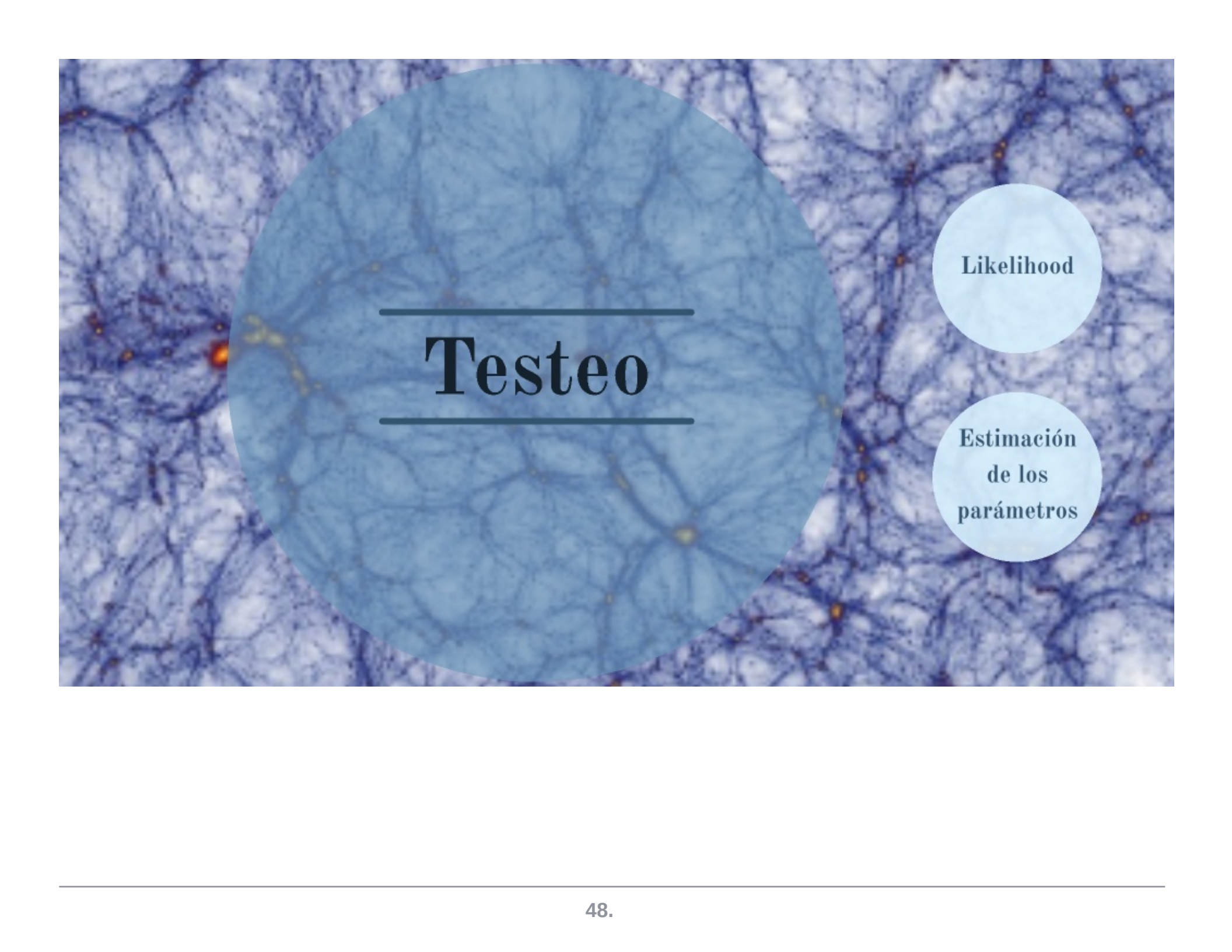
Testeo

Fundamentos

Data set

Modelo

Conclusiones



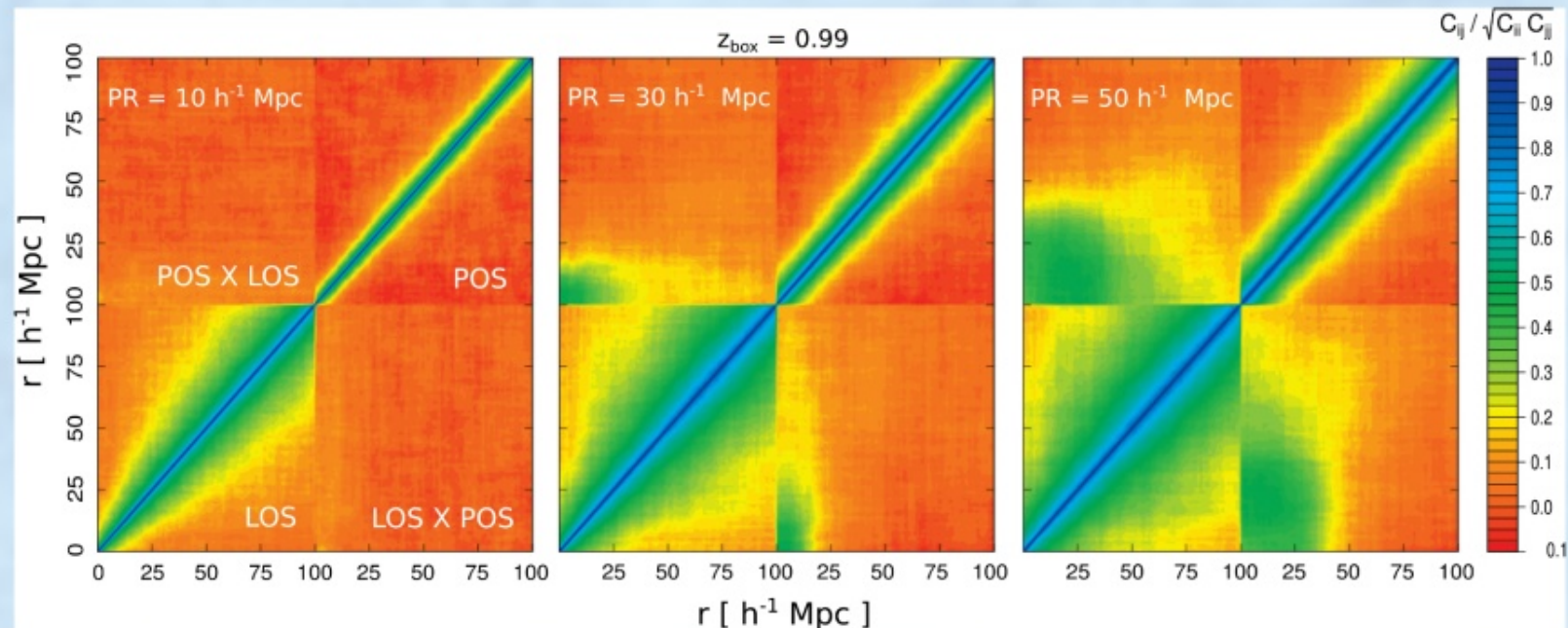
Testeo

Likelihood

Estimación
de los
parámetros

Análisis likelihood

Correa et al. 2019



- Markov Chain Monte Carlo (**MCMC**)
- Matrices de **covarianza** a partir de re-muestreos **Jackknife**

Matrices de covarianza

Virtudes



**Dimensionalmente
pequeñas**



**Inversión
numéricamente
estable**

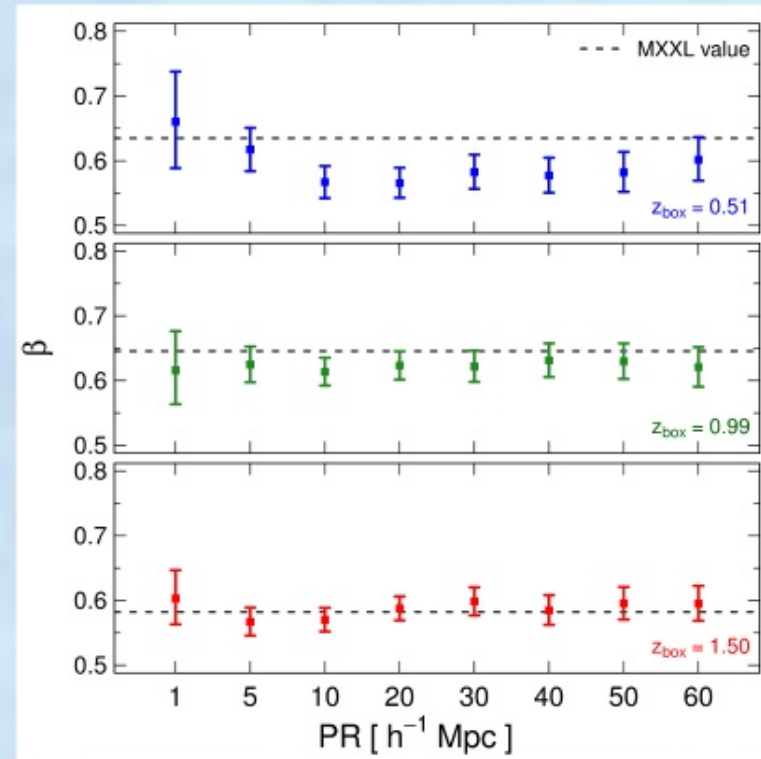
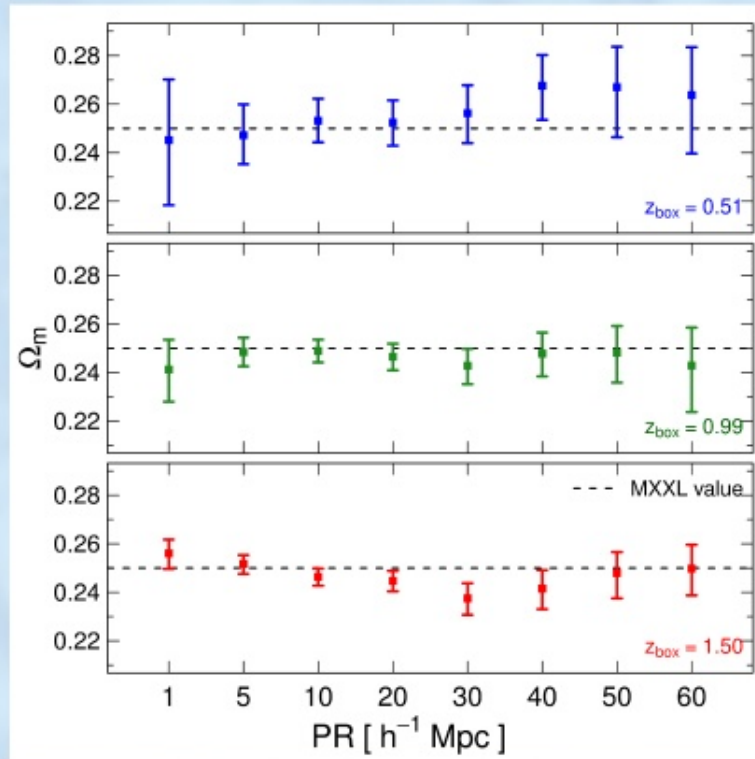


**Reducción
del ruido**



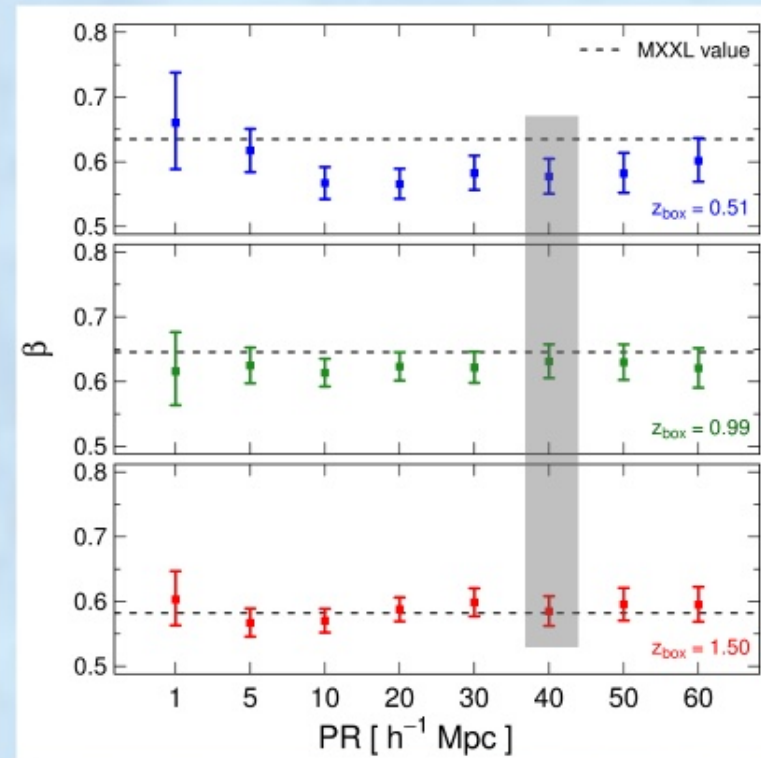
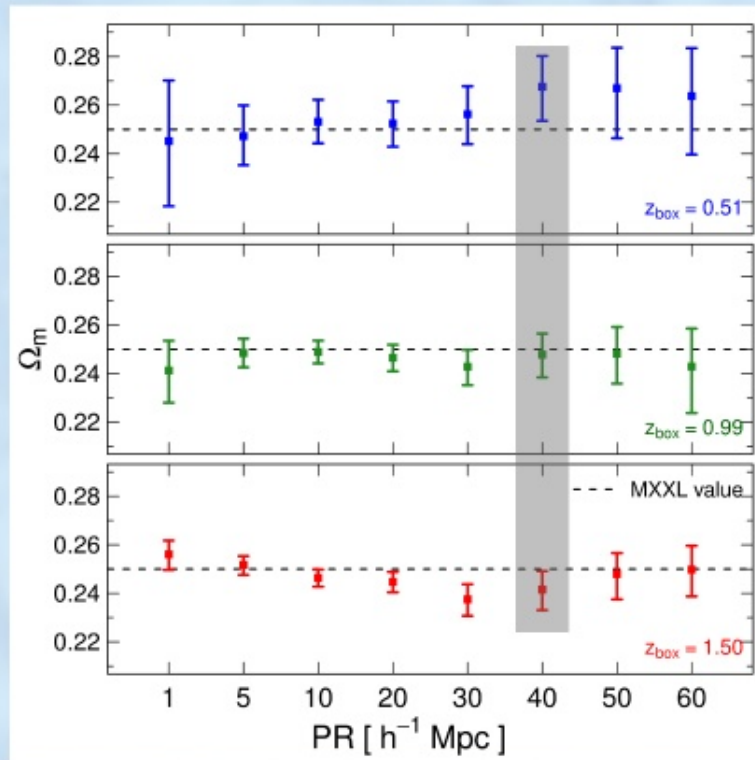
**Reducción de la
cantidad de
mocks necesarios**

Estimación de los parámetros



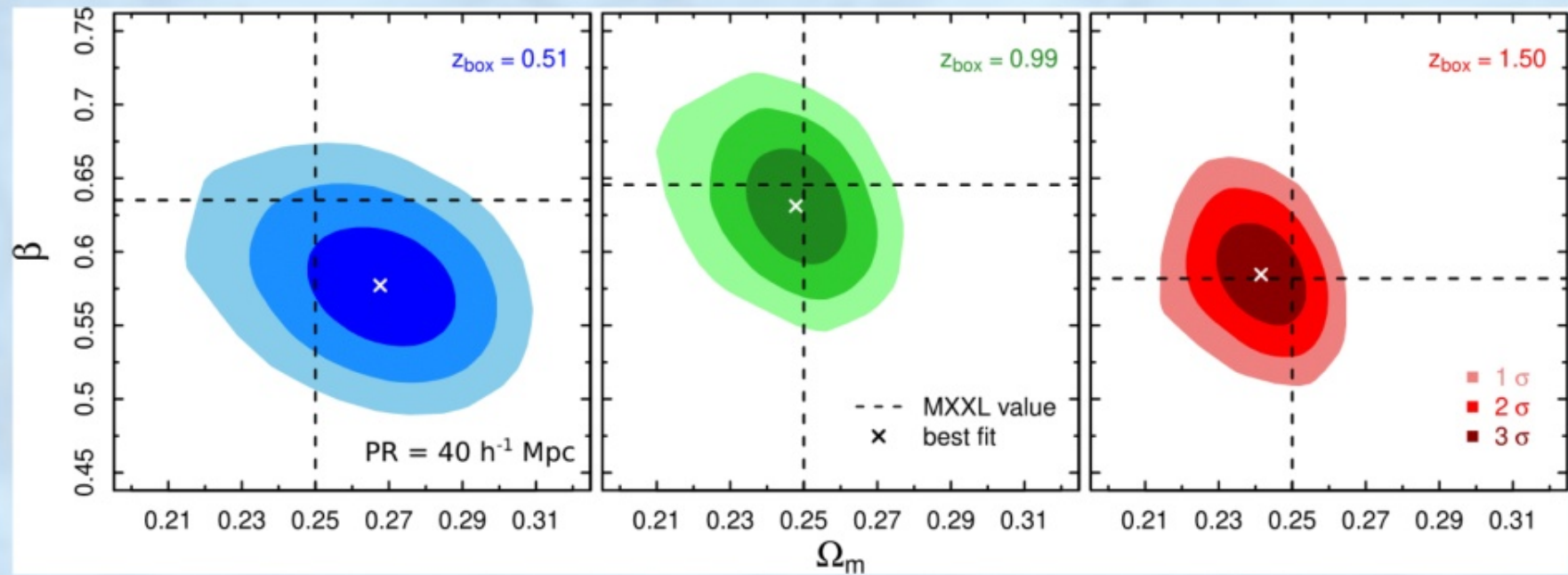
Correa et al. 2019

Estimación de los parámetros

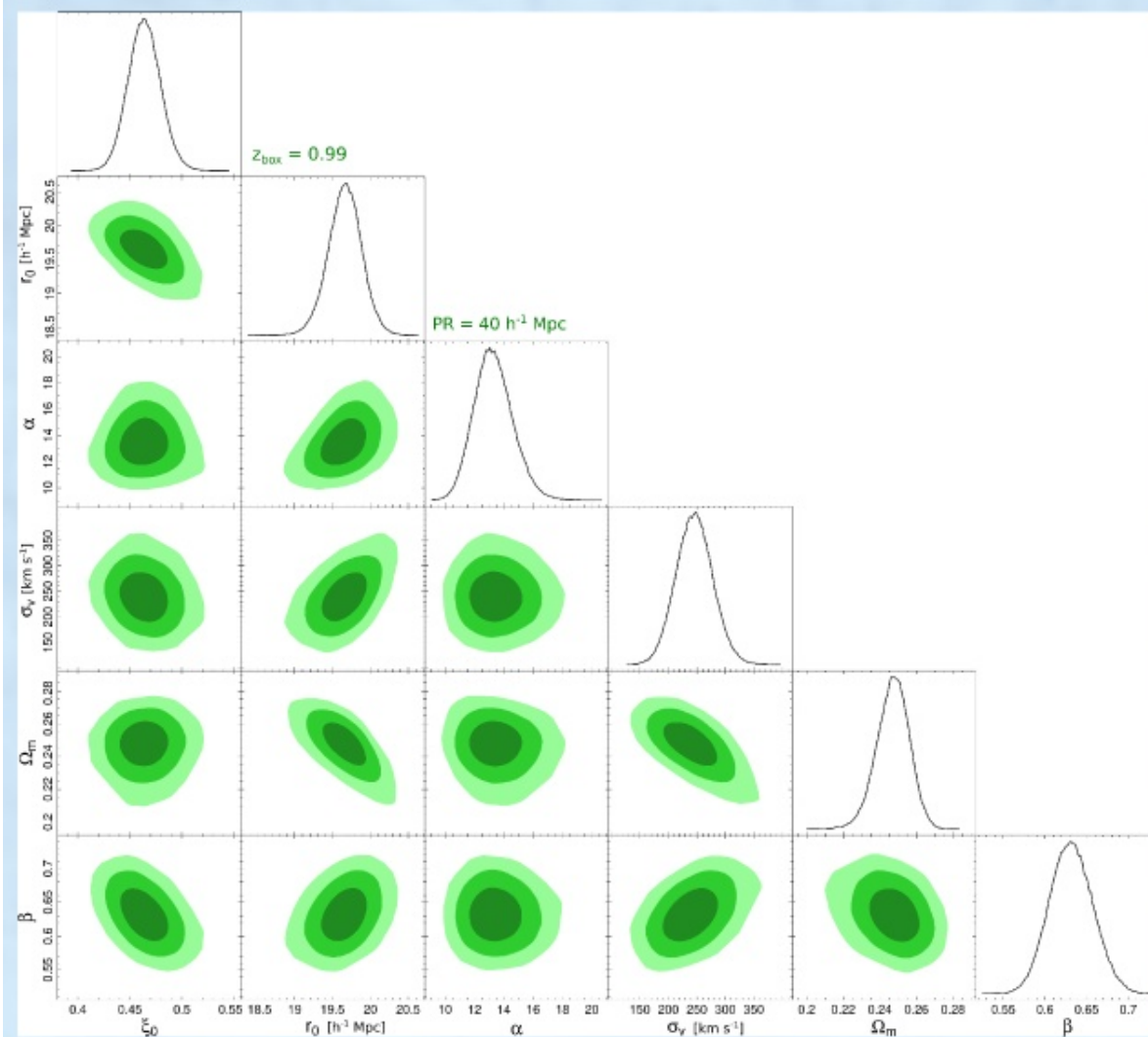


Correa et al. 2019

Estimación de los parámetros

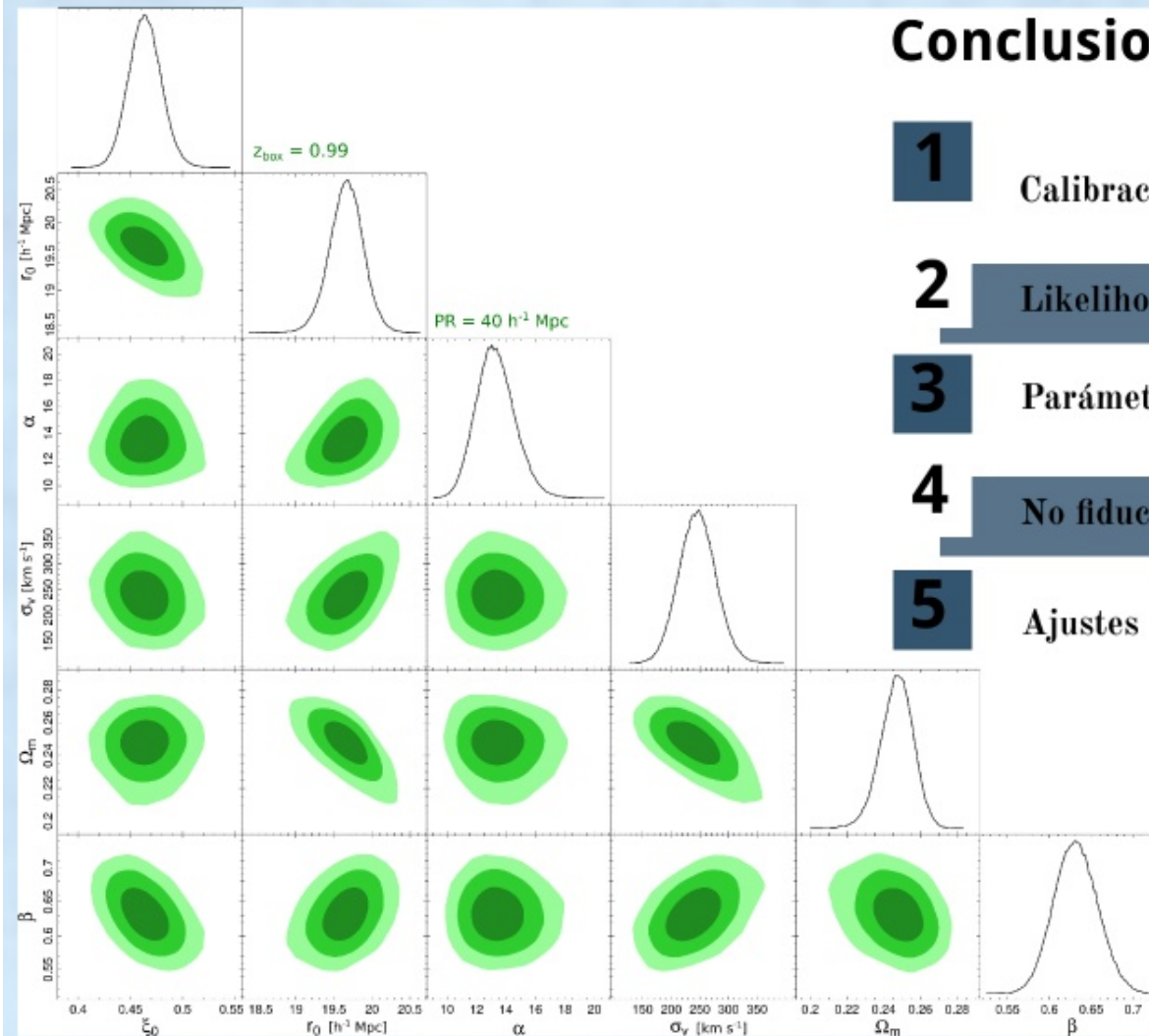


Correa et al. 2019



Correa et al. 2019

Conclusiones parciales



1

Calibración

Recuperación de los parámetros MXXL
(1 σ mayoría; 3 σ todos)

2

Likelihood

Distribuciones Gaussianas

3

Parámetros

No hay degeneraciones

4

No fiducial

Estimación conjunta de Ω_m y β
Modelado conjunto de GD y RSD

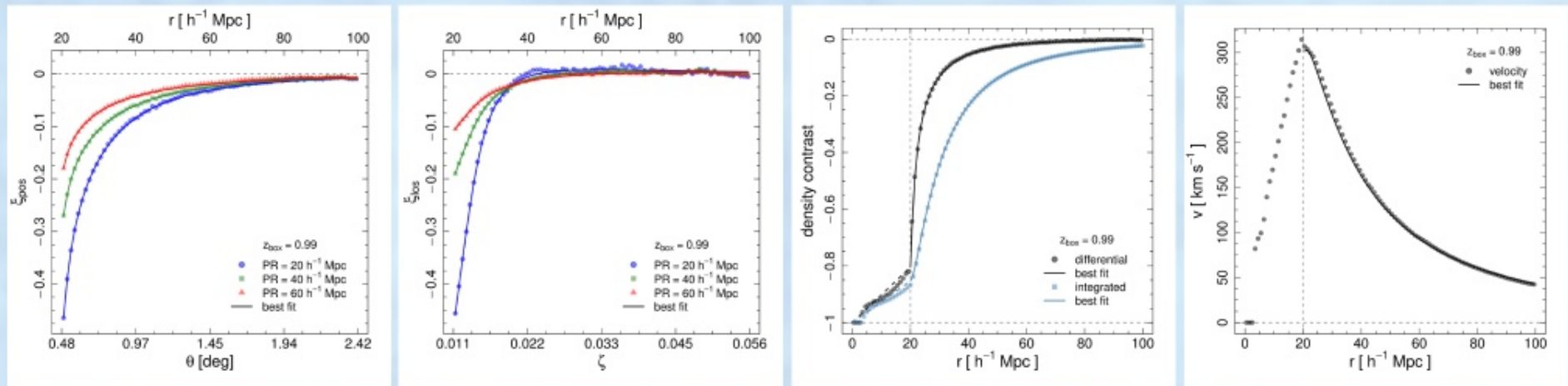
5

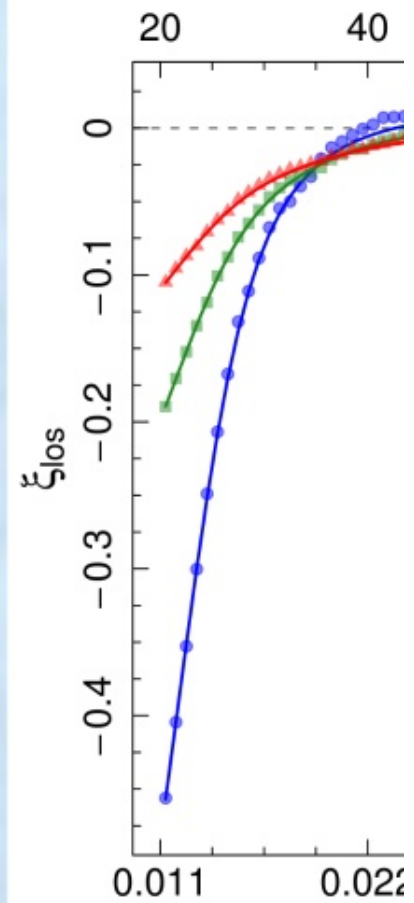
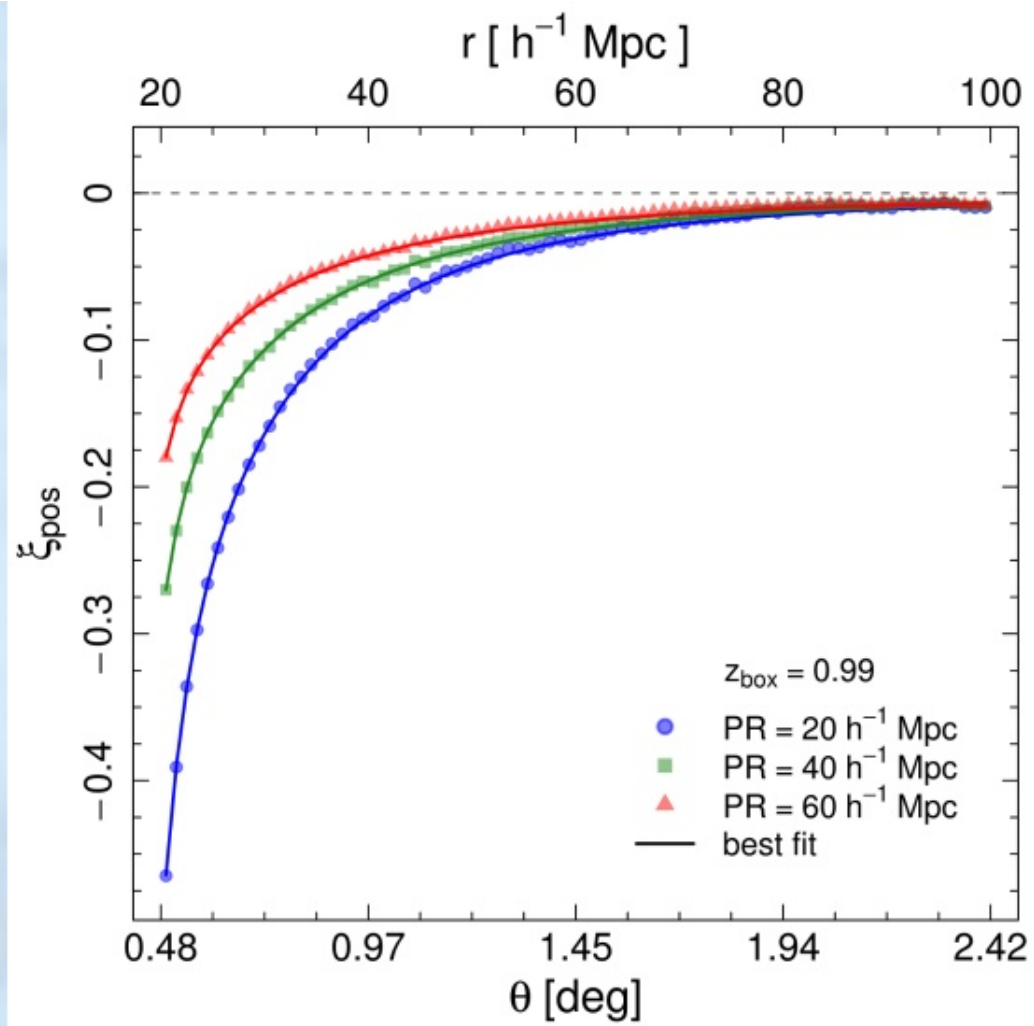
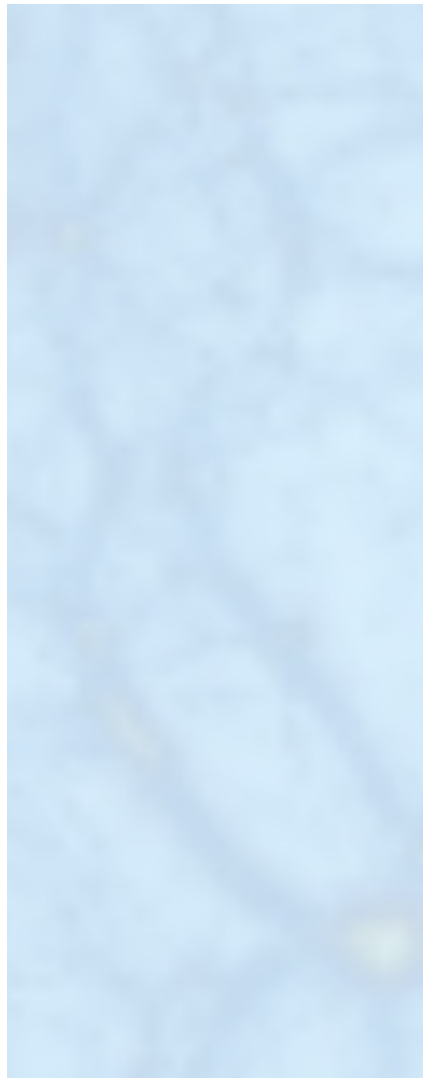
Ajustes

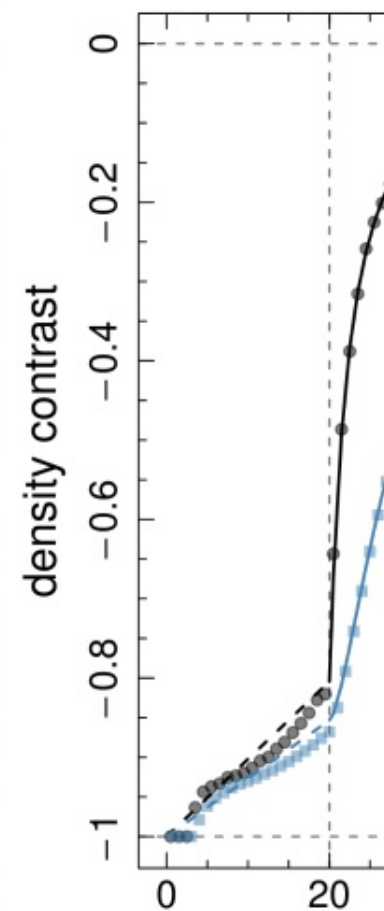
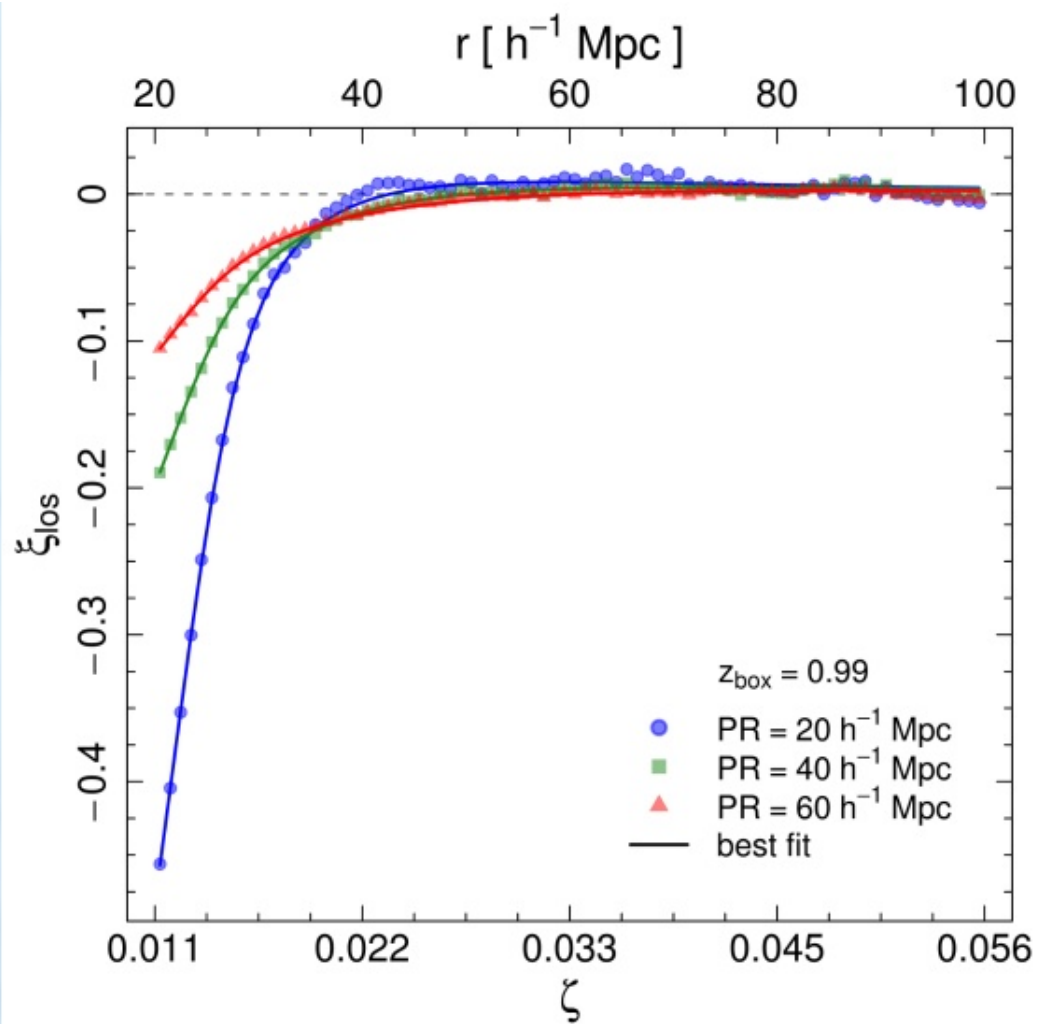
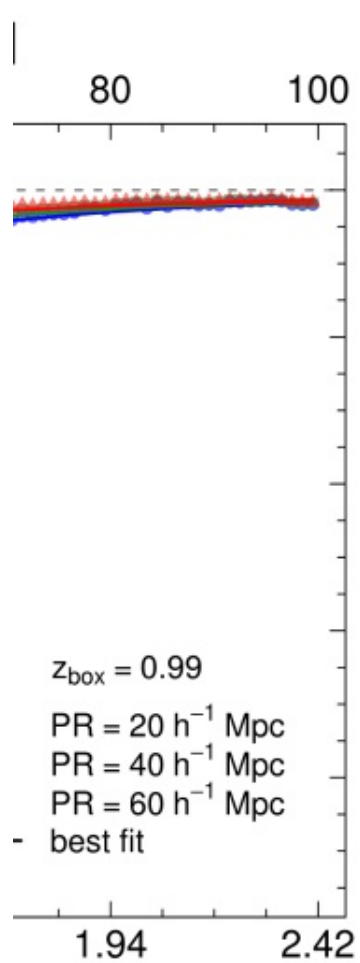
Modelo ajusta las correlaciones proyectadas,
perfiles de densidad y velocidad medidas

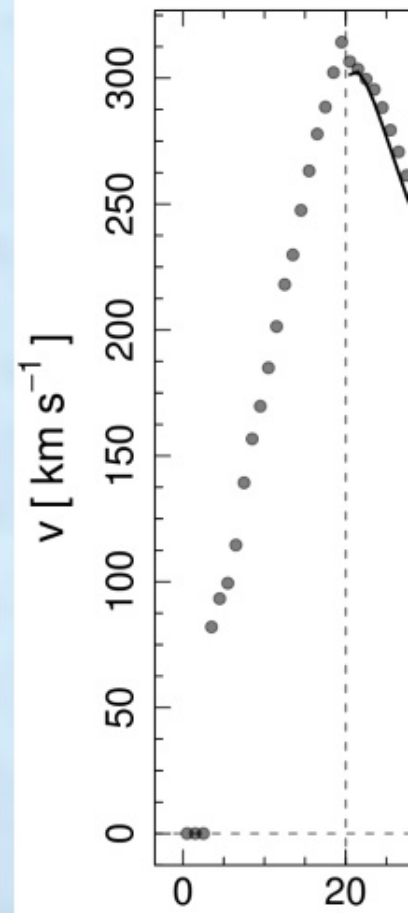
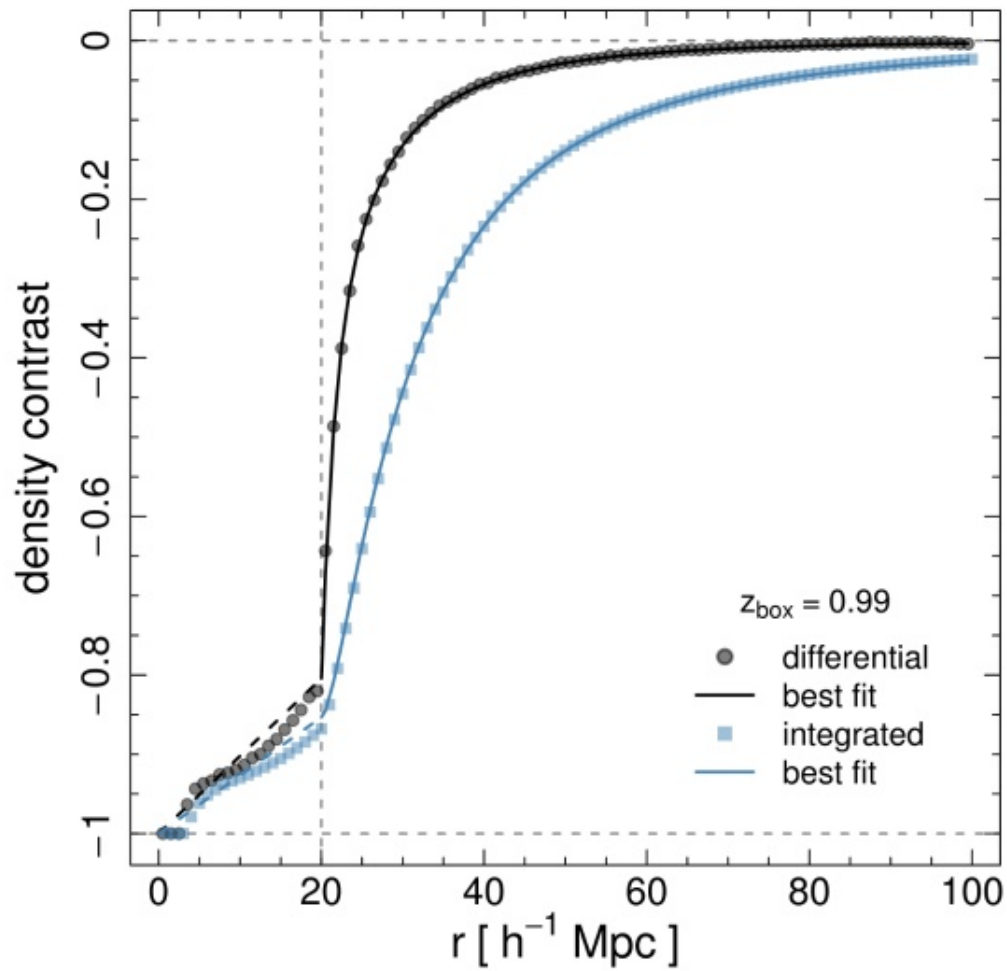
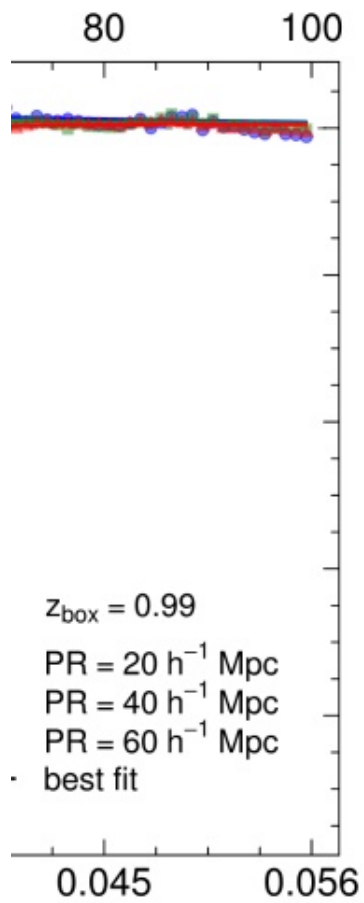
Correa et al. 2019

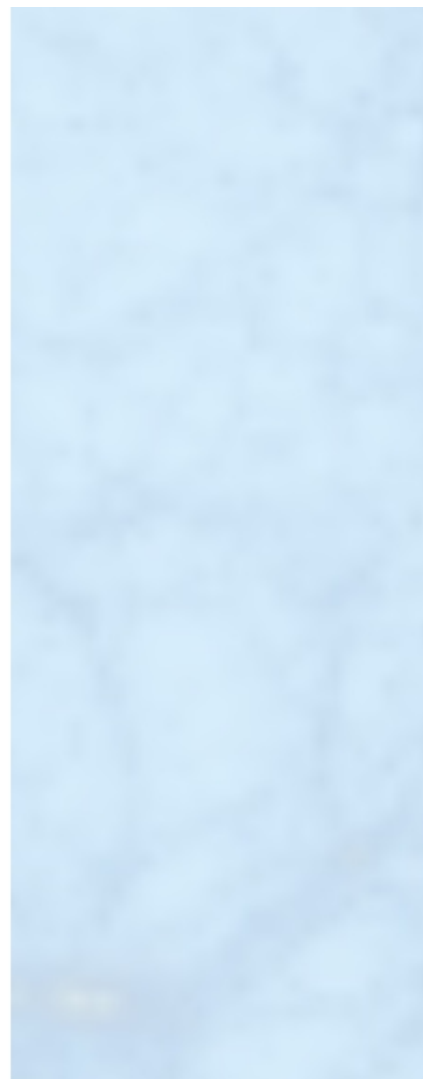
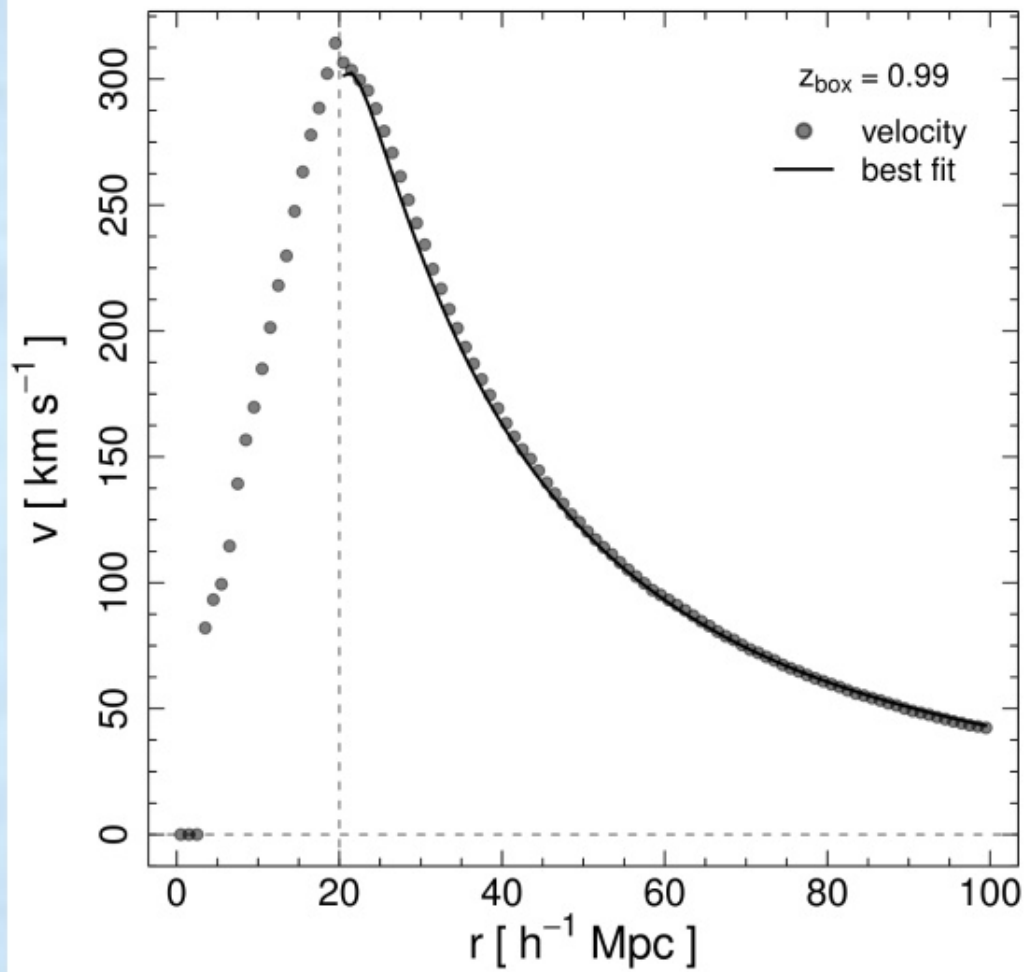
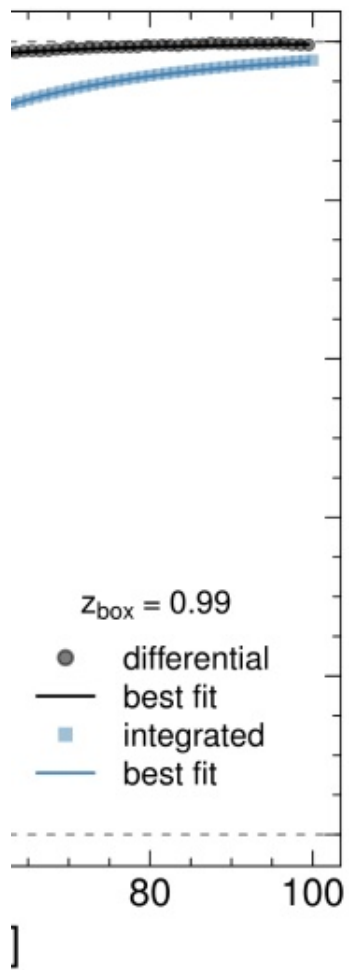
Ajustes











Índice

Portada

Carlos Mauricio Correa
Director: Dr. Dante Paz
Seminario I de Doctorado
FaMAF - IATE - OAC

Introducción

Mediciones

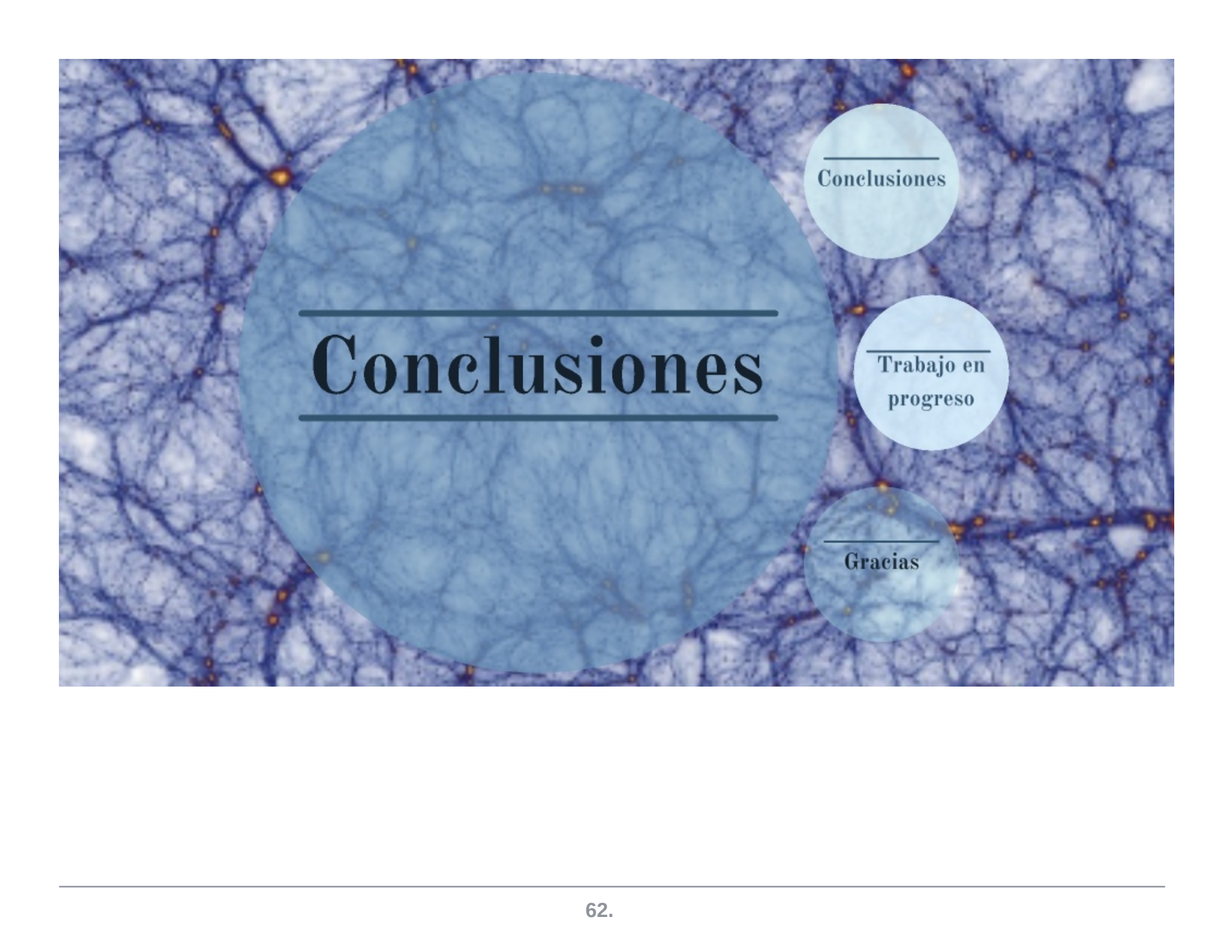
Testeo

Fundamentos

Data set

Modelo

Conclusiones



Conclusiones

Conclusiones

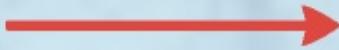
Trabajo en
progreso

Gracias

Conclusiones

- Los **voids** constituyen poderosos **laboratorios cosmológicos**:
 - AP tests
 - estudios RSD
 - tests de gravedad modificada
- **Estadísticos** principales:
 - distribución de tamaños (abundancia)
 - **función de correlación** (void-void y **void-galaxia**)
- Test cosmológico **no fiduciario**: correlaciones medidas directamente en términos de **ángulos** y **redshifts** entre pares void-galaxia.

Conclusiones

- **Modelado** de **sistematicidades** sensibles a la **parámetros cosmológicos**:
 - **distorsiones geométricas (GD)**  Ω_m
 - **distorsiones dinámicas (RSD)**  β
 - **topología del bineado (mezcla de escalas / proyección)**
- **Calibración** del método utilizando la Simulación Millennium XXL
- Matrices de **covarianza** más **pequeñas** y **dóciles**



En progreso

Descentrado

**Aplicación
surveys**

**Abundancia
de voids**

Descentrado

- Modelado de **sistematicidades** sensibles a la **parámetros cosmológicos**:

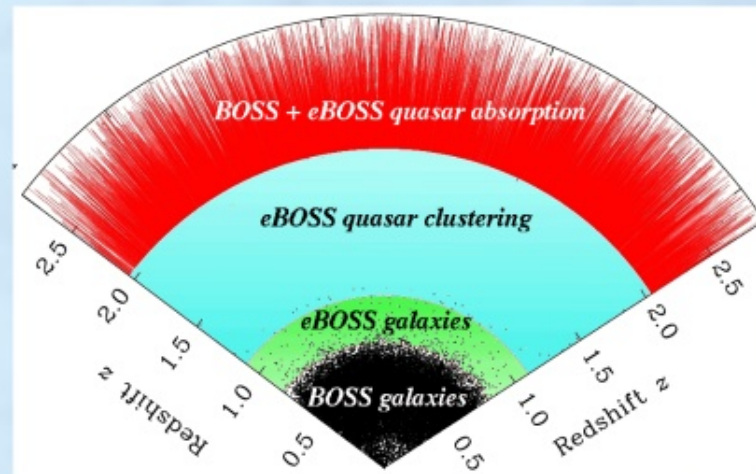
✓ • **distorsiones geométricas (GD)** $\longrightarrow \Omega_m$

✓ • **distorsiones dinámicas (RSD)** $\longrightarrow \beta$

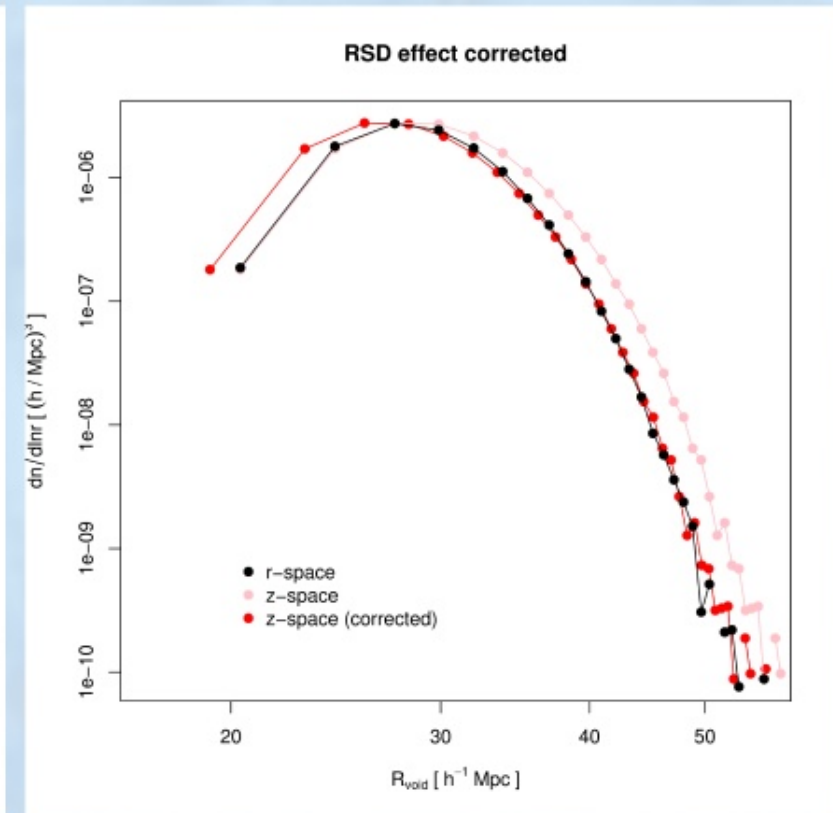
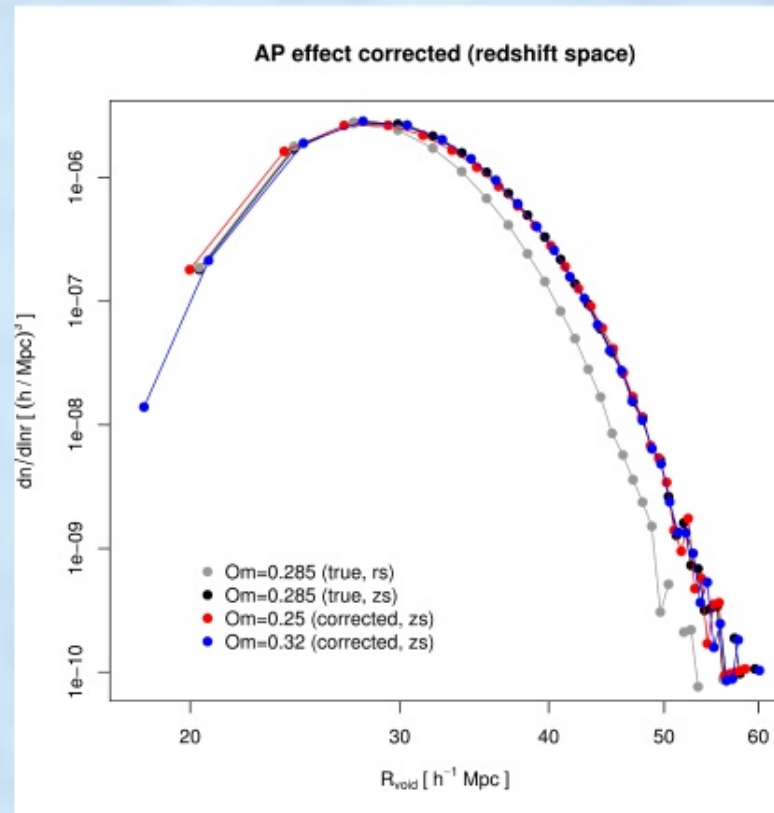
✓ • **topología del bineado (mezcla de escalas / proyección)**

🔧 • **descentrado por identificación en redshift-space (RSD' + AP')**

Aplicación a surveys



Abundancia de voids



Muchas gracias



Índice

Portada

Carlos Mauricio Correa
Director: Dr. Dante Paz
Seminario I de Doctorado
FaMAF - IATE - OAC

Introducción

Mediciones

Testeo

Fundamentos

Data set

Modelo

Conclusiones