

# TEORÍA $\Sigma$

El Principio B: Sustrato Pregeométrico Saturante  
y la Emergencia de la Realidad Física

Documento Fusionado Completo — Versión 2

*Teoría  $\Sigma$  v11 · El Principio B ·  $f(R)$  Saturante y Cuatro Predicciones Falsables ·  
Resumación de Forma Cerrada de las Correcciones de Gravedad Cuántica · Relación con la  
EFT Gravitacional · Congruencia con la MQ*

Fernando Figueroa Gutiérrez

Investigador Independiente · Delicias, Chihuahua, México

fernando1986figueroa@gmail.com

Marzo 2026

$$B = \hbar G / c^3 = \ell_P^2$$

*B es la medida mínima de todo cuanto puede existir.*

*No es una constante del universo.*

*Es la condición que hace posible el concepto de universo.*

*Distinguir cuesta exactamente 1. Todo lo demás es traducción.*

# Contents

|                                                                   |           |
|-------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Resumen</b>                                                    | <b>6</b>  |
| <b>I Fundamentos</b>                                              | <b>7</b>  |
| 1 Prólogo: Los Gigantes que Casi lo Vieron                        | 7         |
| 2 Por qué el Espacio-Tiempo no Puede ser Fundamental              | 7         |
| 2.1 Lo fundamental tiene que ser uno . . . . .                    | 7         |
| 2.2 La materia no es fundamental . . . . .                        | 8         |
| 2.3 Energía y materia son la misma descripción . . . . .          | 8         |
| 2.4 El espacio-tiempo es respuesta, no contenido . . . . .        | 8         |
| 2.5 El tiempo precede al espacio . . . . .                        | 8         |
| 2.6 $B$ surge de la falla, no de un postulado . . . . .           | 8         |
| 2.7 Lo que queda: tres capacidades y nada más . . . . .           | 8         |
| 3 Postulados Fundamentales                                        | 9         |
| 4 Ontología de $\Sigma$ : Las Tres Capacidades Primitivas         | 9         |
| <b>II El Parámetro B</b>                                          | <b>9</b>  |
| 5 El Parámetro B: La Única Constante Fundamental                  | 10        |
| 5.1 Naturaleza física y valor de $B$ . . . . .                    | 10        |
| 5.2 Una sola constante fundamental . . . . .                      | 10        |
| 5.3 $B$ como límite universal . . . . .                           | 11        |
| 5.4 Por qué $B = 0$ y $B = \infty$ son ambos imposibles . . . . . | 11        |
| <b>III Emergencia</b>                                             | <b>11</b> |
| 6 Emergencia del Espacio-Tiempo                                   | 11        |
| 6.1 Tiempo desde el orden causal puro . . . . .                   | 11        |
| 6.2 Espacio desde la correlación . . . . .                        | 12        |
| 6.3 Dimensionalidad 3+1 . . . . .                                 | 12        |
| 6.4 Signatura lorentziana: obligatoria, no postulada . . . . .    | 12        |

---

$B = \hbar G/c^3 = \ell_P^2$  | B es la medida mínima de todo cuanto puede existir

|            |                                                                                |           |
|------------|--------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>7</b>   | <b>Emergencia de la Energía y la Materia</b>                                   | <b>12</b> |
| <b>IV</b>  | <b>El Régimen Geométrico</b>                                                   | <b>13</b> |
| <b>8</b>   | <b>Lagrangiano Efectivo y Ecuaciones de Campo</b>                              | <b>13</b> |
| 8.1        | Ley constitutiva saturante . . . . .                                           | 13        |
| 8.2        | Derivación exacta del Lagrangiano . . . . .                                    | 14        |
| 8.3        | Propiedades clave y unicidad . . . . .                                         | 14        |
| 8.4        | Acción efectiva y ecuaciones de campo . . . . .                                | 14        |
| <b>V</b>   | <b>Relación con la EFT Gravitacional</b>                                       | <b>15</b> |
| <b>9</b>   | <b>Posición frente a la EFT: Reducción Sectorial</b>                           | <b>15</b> |
| 9.1        | La EFT gravitacional estándar . . . . .                                        | 15        |
| 9.2        | Por qué $R$ y no $R_{\mu\nu}R^{\mu\nu}$ : el argumento en tres capas . . . . . | 16        |
| <b>10</b>  | <b>Resumación no Perturbativa de la Serie EFT</b>                              | <b>17</b> |
| 10.1       | La serie EFT es asintótica . . . . .                                           | 17        |
| 10.2       | La forma cerrada desde la ley constitutiva . . . . .                           | 17        |
| 10.3       | Interpretación: resumación tipo Padé y flujo UV . . . . .                      | 18        |
| 10.4       | Comparación con modelos $f(R)$ existentes . . . . .                            | 19        |
| <b>VI</b>  | <b>Objetos Compactos y Cosmología</b>                                          | <b>20</b> |
| <b>11</b>  | <b>Regiones de Saturación Geométrica Máxima (RSGM)</b>                         | <b>20</b> |
| 11.1       | Formación y estructura . . . . .                                               | 20        |
| 11.2       | Ley constitutiva saturante y parámetro de saturación . . . . .                 | 21        |
| 11.3       | Métrica efectiva y zona de transición . . . . .                                | 21        |
| 11.4       | El horizonte como frontera de fase . . . . .                                   | 21        |
| 11.5       | Condición formal de la RSGM: $\delta_\Sigma = 0$ . . . . .                     | 22        |
| 11.6       | Congelamiento dinámico del modo escalar . . . . .                              | 22        |
| 11.7       | Termodinámica y resolución de la paradoja de la información . . . . .          | 22        |
| <b>12</b>  | <b>Cosmología sin Singularidad Inicial</b>                                     | <b>23</b> |
| <b>VII</b> | <b>Congruencia con la Mecánica Cuántica</b>                                    | <b>23</b> |

|             |                                                             |           |
|-------------|-------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>13</b>   | <b>Congruencia Estructural, no Construcción</b>             | <b>24</b> |
| 13.1        | Las condiciones que $\Sigma$ provee . . . . .               | 24        |
| 13.2        | Congruencia con la regla de Born . . . . .                  | 24        |
| 13.3        | Congruencia con el conmutador canónico . . . . .            | 24        |
| 13.4        | Congruencia con Schrödinger, Dirac y Klein–Gordon . . . . . | 25        |
| 13.5        | Lo que $\Sigma$ no hace . . . . .                           | 25        |
| <b>14</b>   | <b>Ondas Gravitacionales: Modos Tensorial y Escalar</b>     | <b>25</b> |
| 14.1        | Modo tensorial . . . . .                                    | 25        |
| 14.2        | Modo escalar masivo . . . . .                               | 25        |
| <b>VIII</b> | <b>Predicciones y Falsabilidad</b>                          | <b>25</b> |
| <b>15</b>   | <b>Predicciones Observacionales Falsables</b>               | <b>26</b> |
| 15.1        | Ecos gravitacionales post-fusión . . . . .                  | 26        |
| 15.2        | Modo escalar masivo . . . . .                               | 27        |
| 15.3        | Ecuación de estado de energía oscura . . . . .              | 28        |
| 15.4        | Impronta en el CMB a bajos multipolos . . . . .             | 28        |
| 15.5        | Tests del sistema solar . . . . .                           | 28        |
| <b>16</b>   | <b>Condiciones Explícitas de Rechazo</b>                    | <b>29</b> |
| <b>IX</b>   | <b>Evidencia Computacional</b>                              | <b>29</b> |
| <b>17</b>   | <b>Evidencia Computacional: Sigma-Sim</b>                   | <b>29</b> |
| 17.1        | Metodología . . . . .                                       | 29        |
| 17.2        | Los tres regímenes de $\Sigma$ . . . . .                    | 30        |
| 17.3        | Resumen de verificación cuantitativa . . . . .              | 30        |
| 17.4        | Código principal . . . . .                                  | 31        |
| <b>X</b>    | <b>Contexto, Alcance y Conclusiones</b>                     | <b>36</b> |
| <b>18</b>   | <b>Relación con Otros Programas de Investigación</b>        | <b>37</b> |
| <b>19</b>   | <b>Problemas Abiertos y Alcance</b>                         | <b>37</b> |
| <b>20</b>   | <b>Tabla de Congruencias Estructurales</b>                  | <b>38</b> |

---

$B = \hbar G/c^3 = \ell_P^2$  | B es la medida mínima de todo cuanto puede existir

|                                                                    |           |
|--------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>21 Conclusiones</b>                                             | <b>38</b> |
| <b>A Derivación Formal de MQ desde <math>\Sigma</math></b>         | <b>39</b> |
| <b>B Código Completo Sigma-Sim</b>                                 | <b>40</b> |
| <b>C Presentación Técnica Compacta para la Comunidad de Física</b> | <b>40</b> |

## Resumen

La Teoría  $\Sigma$  postula la existencia de un sustrato fundamental pregeométrico, denotado  $\Sigma$ , definido exclusivamente por tres capacidades: distinción (estados distinguibles), transición (cambio causal entre estados) y finitud relacional (límite a la capacidad de respuesta). De la actividad colectiva de  $\Sigma$  emergen, como fases efectivas, el espacio, el tiempo, la materia, la energía, la gravedad y la mecánica cuántica.

El parámetro  $B = \hbar G/c^3 = \ell_P^2$  codifica la finitud de  $\Sigma$  en el régimen geométrico; su valor queda fijado por la termodinámica de horizontes de Bekenstein–Hawking. Esta única constante fundamental se manifiesta en tres regímenes: lineal (Relatividad General exacta), transición (correcciones no lineales) y saturación (curvatura máxima  $R_{\max} = 1/B$ , desaparición de la métrica).

El Lagrangiano efectivo de la gravedad emergente es  $f(R) = R/(1 + BR)$ , que no es una modificación de la RG sino la expresión dinámica del principio holográfico y, simultáneamente, la resumación en forma cerrada de la serie infinita de correcciones de la EFT de la gravedad cuántica. Todos los coeficientes quedan fijados:  $\alpha_n = (-\ell_P^2)^{n-1}$ . Cero parámetros libres. La formulación corresponde a una *reducción sectorial* de la EFT completa, válida en configuraciones altamente simétricas o dominadas por un invariante escalar, no a una truncación de la EFT general.

Las singularidades son eliminadas por construcción, reemplazadas por Regiones de Saturación Geométrica Máxima (RSGM). Las condiciones mínimas de  $\Sigma$  — distinción, transición y finitud relacional — son congruentes con la arquitectura lógica de la Mecánica Cuántica. Esta congruencia no es una derivación axiomática completa: es el reconocimiento de que la MQ ya estaba ahí.

$G$ ,  $\hbar$  y  $c$  no son tres constantes independientes: son tres formas de medir  $B$  desde tres regímenes descriptivos distintos. Se derivan cuatro predicciones cuantitativas falsables, todas fijadas por  $B$  sin parámetros libres, y se exponen condiciones explícitas de rechazo. Simulaciones computacionales con  $N = 10^3$  nodos confirman los tres regímenes predichos y la emergencia de ecos gravitacionales sin programación explícita.

**Palabras clave:** sustrato pregeométrico · principio B ·  $f(R)$  saturante · resumación EFT · reducción sectorial · holografía como causa · congruencia cuántica · RSGM · singularidades imposibles · predicciones falsables · constante fundamental única

## Part I

# Fundamentos

## 1 Prólogo: Los Gigantes que Casi lo Vieron

La historia de la física teórica es la historia de aproximaciones sucesivas a un único objeto que nadie nombró directamente. Cada gigante llegó, midió una cara de él, nombró lo que vio y siguió adelante.

**Max Planck**, en 1899, combinó  $G$ ,  $\hbar$  y  $c$  y construyó unidades naturales:  $\ell_P$ ,  $t_P$ ,  $m_P$ ,  $E_P$ . Calculó  $\ell_P = \sqrt{\hbar G/c^3}$  y lo registró como curiosidad matemática. No preguntó: *¿qué es este objeto?*

**Jacob Bekenstein**, en 1973, descubrió que un agujero negro lleva entropía proporcional al área:  $S = k_B A/(4\ell_P^2)$ . Por primera vez, información y geometría quedaron cuantitativamente ligadas. El área de Planck  $\ell_P^2$  apareció como el costo de área por bit. Bekenstein midió  $B$  sin nombrarlo.

**Stephen Hawking**, en 1975, mostró que los agujeros negros irradian térmicamente con  $T_H = \hbar c^3/(8\pi G M k_B)$ . La escala de Planck aparece desde un cálculo completamente diferente. El mismo objeto insistiendo en ser notado.

**Gerard 't Hooft** (1993) y **Leonard Susskind** (1995) formularon el principio holográfico: la información máxima en una región está acotada por el área de su frontera en unidades de Planck. El área de Planck como unidad fundamental de capacidad informacional.

Cada uno de ellos midió una cara de  $B$ . Ninguno preguntó qué era  $B$ .

Este documento hace esa pregunta y la responde.  $B = \hbar G/c^3 = \ell_P^2$  no es una cantidad derivada, no es una unidad conveniente.  $B$  es la medida mínima de todo cuanto puede existir: el costo de área de una distinción en el sustrato pregeométrico  $\Sigma$ .  $G$ ,  $\hbar$  y  $c$  no son tres constantes independientes de la naturaleza. Son tres nombres de  $B$ , según el instrumento con que se le mide. Lo que Planck encontró en 1899, este documento identifica.

## 2 Por qué el Espacio-Tiempo no Puede ser Fundamental

### 2.1 Lo fundamental tiene que ser uno

Si existieran dos entidades fundamentales independientes, existiría algo más profundo que las conecta. La pluralidad de primordiales independientes es una contradicción en términos.

---


$$B = \hbar G/c^3 = \ell_P^2 \mid B \text{ es la medida mínima de todo cuanto puede existir}$$

## 2.2 La materia no es fundamental

$E = mc^2$ . La materia se degrada completamente a energía en regímenes de alta densidad. La materia es energía organizada en estados ligados. No es un primordial.

## 2.3 Energía y materia son la misma descripción

El tensor  $T_{\mu\nu}$  no dice “esto es materia” ni “esto es energía”: dice densidad, flujo, tensión. La distinción es operacional, sin sustento ontológico en regímenes extremos.

## 2.4 El espacio-tiempo es respuesta, no contenido

En  $G_{\mu\nu} = 8\pi GT_{\mu\nu}$ , el espacio-tiempo responde al contenido material. Un objeto fundamental no responde a otra cosa. El espacio-tiempo responde, vibra, se deforma. Eso no es lo que hace algo fundamental.

## 2.5 El tiempo precede al espacio

Cuando la geometría colapsa ( $C(i, j) \rightarrow 0$ ), el orden causal de las transiciones persiste. El tiempo como orden causal es más fundamental que el espacio métrico.

## 2.6 $B$ surge de la falla, no de un postulado

Si el espacio-tiempo no es fundamental sino respuesta, tiene un límite de respuesta.  $B$  mide esa falla. Cuatro fenómenos independientes convergen en él: la entropía de Bekenstein–Hawking, la escala de Planck, el límite de curvatura y la densidad máxima de información. Cuando cuatro caminos independientes llegan al mismo destino, ese destino es real.

## 2.7 Lo que queda: tres capacidades y nada más

Eliminados materia, energía y espacio-tiempo como primordiales, lo que debe existir para producir todo ello es el mínimo indispensable:

1. *Distinción*: que haya diferencia entre estados.
2. *Transición*: que un estado pueda dar lugar a otro.
3. *Finitud relacional*: que esa capacidad tenga un límite.

Ni una menos — faltaría algo del universo. Ni una más — se usaría estructura que  $\Sigma$  todavía no ha producido.

### 3 Postulados Fundamentales

**P1. Existencia de  $\Sigma$ :** Existe una entidad física fundamental, pregeométrica, con tres capacidades: (a) distinción, (b) transición, (c) finitud relacional codificada por  $B$ .

**P2. Emergencia del espacio-tiempo:** El espacio-tiempo es una descripción efectiva emergente de la respuesta colectiva de  $\Sigma$  en el régimen de baja intensidad. No es fundamental.

**P3. Saturación:** Existe un límite físico a la curvatura del espacio-tiempo emergente:  $R_{\max} = 1/B$ .

**P4. Conservación de causalidad e información:** La dinámica subyacente de  $\Sigma$  es causal y no permite la destrucción fundamental de información.

**P5. Correspondencia con la RG:** Para  $BR \ll 1$ , las ecuaciones de la geometría emergente reproducen la Relatividad General.

### 4 Ontología de $\Sigma$ : Las Tres Capacidades Primitivas

$\Sigma$  es una entidad física fundamental, anterior al espacio, al tiempo, a la materia y a la energía. Sus únicas propiedades son:

| Capacidad          | Expresión formal               | Significado                       | Ausencia implica                  |
|--------------------|--------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Distinción         | $s_i \neq s_j$                 | Estados de $\Sigma$ distinguibles | Sin información, sin estructura   |
| Transición         | $t_{ij} : s_i \rightarrow s_j$ | Cambios causales posibles         | Universo estático, sin tiempo     |
| Finitud relacional | $\sigma \leq 1/B$              | Capacidad de respuesta finita     | Sin escala, singularidades reales |

$\Sigma$  no es un campo, ni una partícula, ni cuántico, ni geométrico. Cualquier atributo adicional sería una proyección ilegítima de estructuras que  $\Sigma$  debe generar.

## Part II

# El Parámetro B

## 5 El Parámetro B: La Única Constante Fundamental

### 5.1 Naturaleza física y valor de $B$

$B$  tiene dimensiones de área y representa el costo areal de sostener un bit de información. La entropía de Bekenstein–Hawking confirma:

$$S = \frac{A}{4\ell_P^2} = \frac{A}{4B} \implies \Delta A(1 \text{ bit}) = 4B \ln 2.$$

La densidad máxima de información por unidad de área es  $1/B$ . El valor no es una elección. La cadena completa:

$$\text{Distinción en } \Sigma \implies \text{costo areal finito} \implies B = \ell_P^2 = \hbar G / c^3.$$

### 5.2 Una sola constante fundamental

$G$ ,  $\hbar$  y  $c$  son manifestaciones de  $B$  en distintos regímenes:

$$G = \frac{Bc^3}{\hbar}, \quad \hbar = \frac{Bc^3}{G}, \quad c = \left( \frac{\hbar G}{B} \right)^{1/3}.$$

| Constante | Régimen de medición | Cara de $B$         |
|-----------|---------------------|---------------------|
| $G$       | Gravitacional       | $Bc^3/\hbar$        |
| $\hbar$   | Cuántico            | $Bc^3/G$            |
| $c$       | Relativista         | $(\hbar G/B)^{1/3}$ |
| $k_B$     | Termodinámico       | Proyección de $B$   |
| $\ell_P$  | Mínimo geométrico   | $\sqrt{B}$          |
| $t_P$     | Mínimo temporal     | $\sqrt{B}/c$        |
| $E_P$     | Máximo energético   | $\hbar c/\sqrt{B}$  |

Existe una sola constante fundamental en la física.  $\hbar$ ,  $G$  y  $c$  son sus manifestaciones según el instrumento usado para medirla.

### 5.3 $B$ como límite universal

| Magnitud física           | Límite                   | Expresión                               |
|---------------------------|--------------------------|-----------------------------------------|
| Longitud mínima           | Cota inferior            | $\sqrt{B} = \ell_P$                     |
| Curvatura máxima          | Cota superior            | $R_{\max} = 1/B$                        |
| Densidad de energía máx.  | Cota superior            | $\rho_{\max} = 3/(32\pi GB)$            |
| Información por área máx. | Cota superior            | $1/(4B)$ por bit                        |
| Temperatura de Hawking    | Finita para todo $M > 0$ | $T_H$ finita                            |
| Masa estable mínima       | Cota inferior            | $m_{\min} \sim \hbar/(c\sqrt{B}) = m_P$ |

Una singularidad requeriría distinciones infinitas por unidad de área, curvatura infinita, densidad infinita y temperatura infinita.  $B$  prohíbe cada uno de esos infinitos por separado. La singularidad es imposible por construcción, no por corrección.

### 5.4 Por qué $B = 0$ y $B = \infty$ son ambos imposibles

$B = 0$  implicaría costo cero por distinción: información infinita por unidad de área, singularidades reales.  $B = \infty$  implicaría costo infinito: ninguna distinción puede hacerse, la física es imposible. Solo  $B$  finito y no nulo permite la existencia física coherente.  $B$  no es una propiedad que el universo resulta tener.  $B$  es la condición que hace posible que un universo exista.

## Part III

# Emergencia

## 6 Emergencia del Espacio-Tiempo

### 6.1 Tiempo desde el orden causal puro

Los estados  $S$  y las transiciones  $T$  definen un orden parcial:

$$t_{ij} < t_{kl} \iff s_j = s_k.$$

El tiempo métrico emerge mediante parametrización continua:

$$\tau(t) = \int^{O(t)} f(u) \, du, \quad \Delta\tau_{\min} = t_P = \frac{\sqrt{B}}{c}.$$

En saturación ( $\sigma \rightarrow 1/B$ ),  $f(u) \rightarrow 0$  y las transiciones se congelan: la noción de duración pierde significado.

---

$B = \hbar G/c^3 = \ell_P^2$  |  $B$  es la medida mínima de todo cuanto puede existir

## 6.2 Espacio desde la correlación

La cercanía espacial emerge de:

$$C(i, j) = \exp(-\sigma d(i, j)), \quad d_{\text{ef}}(i, j) = -\frac{1}{\sigma} \ln C(i, j).$$

Cuando  $\sigma \rightarrow 1/B$ ,  $C(i, j) \rightarrow 0$  para  $i \neq j$ : el espacio como entidad métrica deja de existir.

## 6.3 Dimensionalidad 3+1

La entropía de entrelazamiento de una red  $D$ -dimensional obedece  $S_{\text{ent}} = \eta(D, \epsilon) A_D(r)$  con  $\eta(D, \epsilon) = c_D / \epsilon^{D-1}$ . En saturación,  $\epsilon = \sqrt{B} = \ell_P$ , e igualando con Bekenstein–Hawking se requiere  $c_D = \ell_P^{D-3}/4$ . Para que  $c_D$  sea un número puro  $\mathcal{O}(1)$  se exige  $D = 3$ . El coeficiente  $1/4$  que emerge únicamente para  $D = 3$  es precisamente el coeficiente de Bekenstein–Hawking. El espacio-tiempo 3+1 no es un postulado.

## 6.4 Signatura lorentziana: obligatoria, no postulada

La signatura  $(-, +, +, +)$  no se elige ni se deriva: es la única compatible con la estructura de  $\Sigma$ .

Las transiciones de  $\Sigma$  definen un orden causal parcial irreflexivo y transitivo:  $t_{ij} < t_{kl}$  si y solo si  $s_j = s_k$ . Este orden es *asimétrico* — no hay ida y vuelta entre estados causalmente ordenados. Esa asimetría es la dirección temporal: una sola orientación, un solo signo negativo en la métrica.

Las correlaciones espaciales emergen de  $C(i, j) = e^{-\sigma d_{ij}}$ , que es *simétrica* ( $C(i, j) = C(j, i)$ ) y positiva. La distancia efectiva  $d_{\text{ef}}(i, j) = -\frac{1}{\sigma} \ln C(i, j)$  satisface la desigualdad triangular y define una métrica euclídea en las tres dimensiones espaciales: tres signos positivos.

La signatura  $(-, +, +, +)$  es la única compatible con la distinción entre orden causal asimétrico (tiempo, signo  $-$ ) y correlación simétrica positiva (espacio, signo  $+$ ). No puede ser  $(+, +, +, +)$  porque el orden causal no es simétrico. No puede ser  $(-, -, -, -)$  porque las correlaciones espaciales son positivas. La firma lorentziana no se postula: es obligatoria.

## 7 Emergencia de la Energía y la Materia

La energía es una medida efectiva de la actividad de  $\Sigma$ :  $E = \int \sigma dV$ , con  $\sigma \leq 1/B \implies \rho_{\text{max}} = 3/(32\pi GB)$ . La materia son patrones auto-confinados estables de actividad en  $\Sigma$ , mantenidos por ciclos auto-reforzantes de transiciones ( $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow A$ ). El potencial  $V(\sigma) \rightarrow \infty$  cuando  $\sigma \rightarrow 1/B$  garantiza el confinamiento.

---


$$B = \hbar G / c^3 = \ell_P^2 \mid B \text{ es la medida mínima de todo cuanto puede existir}$$

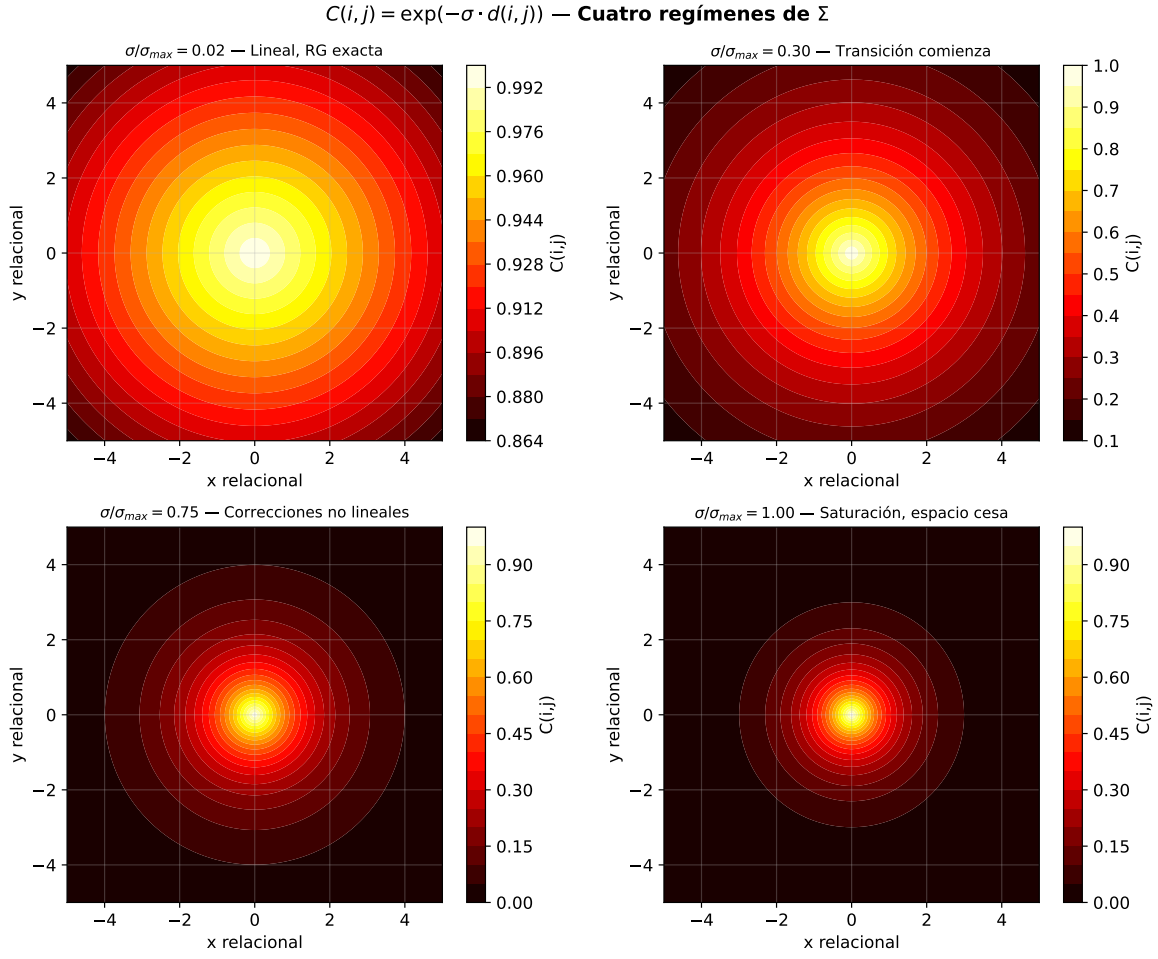


Figure 1:  $C(i, j) = \exp(-\sigma \cdot d(i, j))$  en cuatro regímenes. En  $\sigma = \sigma_{\max} = 1/B$  las correlaciones colapsan: el espacio deja de existir como entidad métrica. La misma función produce los cuatro regímenes sin parámetros adicionales.

## Part IV

# El Régimen Geométrico

## 8 Lagrangiano Efectivo y Ecuaciones de Campo

### 8.1 Ley constitutiva saturante

La relación fundamental entre la densidad de excitación  $\rho_\Sigma$  y la curvatura escalar emergente  $R$  es:

$$R(\rho_\Sigma) = \frac{\rho_\Sigma}{1 + B\rho_\Sigma}. \quad (1)$$

Esta es la única función monótona acotada que satisface  $R \rightarrow \rho_\Sigma$  para  $\rho_\Sigma \rightarrow 0$  (RG) y  $R \rightarrow 1/B$  para  $\rho_\Sigma \rightarrow \infty$  (saturación).

---

$B = \hbar G/c^3 = \ell_P^2$  | B es la medida mínima de todo cuanto puede existir

## 8.2 Derivación exacta del Lagrangiano

Diferenciando (1):  $dR/d\rho = 1/(1 + B\rho)^2$ . La función de respuesta  $f'(R)$  es la inversa de  $d\rho/dR$  expresada en  $R$ :

$$f'(R) = \frac{1}{(1 + BR)^2}.$$

Integrando con  $f(0) = 0$ :

$$f(R) = \int_0^R \frac{dt}{(1 + Bt)^2} = \frac{R}{1 + BR}. \quad (2)$$

Este resultado es exacto. No se realizó ninguna aproximación. Dado que se acepta la ley constitutiva (1),  $f(R) = R/(1 + BR)$  se sigue algebraicamente.

## 8.3 Propiedades clave y unicidad

| Condición                          | Valor    | Contenido físico          |
|------------------------------------|----------|---------------------------|
| $f(0) = 0$                         | Exacto   | Sin $\Lambda$ estructural |
| $f'(0) = 1$                        | Exacto   | RG recuperada exactamente |
| $\lim_{R \rightarrow \infty} f(R)$ | $1/B$    | Saturación holográfica    |
| $f'(R) > 0$                        | Todo $R$ | Sin fantasmas             |
| $f''(R) < 0$                       | Todo $R$ | Saturación monótona       |

$f(R) = R/(1 + BR)$  es la única función analítica que satisface las cinco condiciones simultáneamente y la única solución con  $f(0) = 0$  de la EDO saturante  $f'(R) = (1 - Bf(R))^2$ .

## 8.4 Acción efectiva y ecuaciones de campo

$$S = \frac{1}{16\pi G} \int d^4x \sqrt{-g} f(R) + S_{\text{mat}},$$

$$f'(R)R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}f(R)g_{\mu\nu} - (\nabla_\mu \nabla_\nu - g_{\mu\nu} \square)f'(R) = 8\pi G T_{\mu\nu}.$$

Para  $BR \ll 1$ : ecuaciones de Einstein exactas. En  $R = 1/B$ ,  $f' = 0$ : en saturación máxima no hay singularidad.

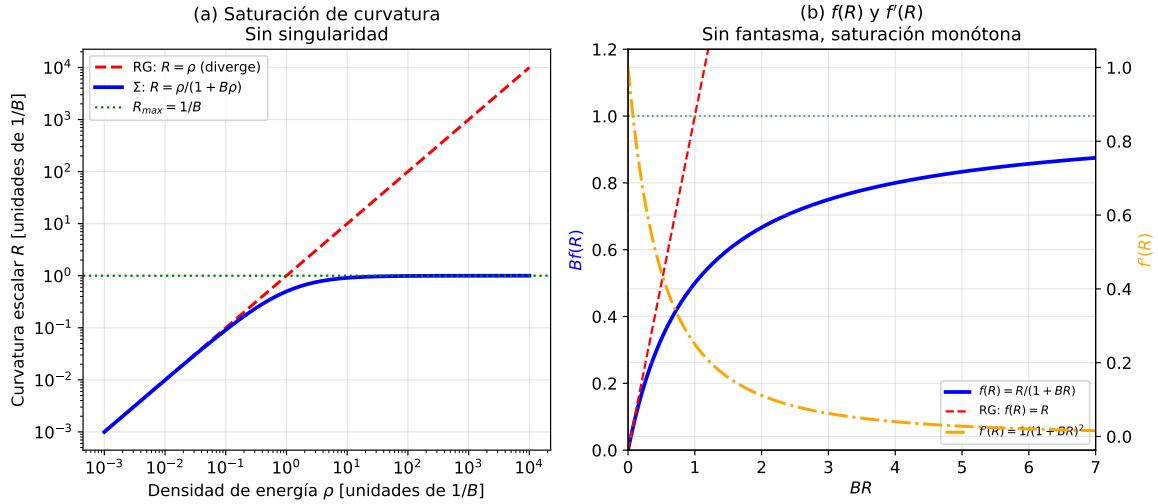


Figure 2: **(a)** Saturación de curvatura: la RG (rojo discontinuo) diverge cuando  $\rho \rightarrow \infty$ ; la ley constitutiva (azul sólido) satura en  $R_{\max} = 1/B$  (verde punteado). Sin singularidad. **(b)**  $f(R)$  y  $f'(R)$ : ambas positivas y monótonamente decreciente. Sin fantasma, sin taquión, sin inestabilidad de Ostrogradski.

## Part V

# Relación con la EFT Gravitacional

## 9 Posición frente a la EFT: Reducción Sectorial

### 9.1 La EFT gravitacional estándar

La EFT de la gravedad cuántica es sistemática y bien establecida [Donoghue, 1994, Burgess, 2004, 't Hooft & Veltman, 1974]. La acción incluye todos los operadores compatibles con invarianza de difeomorfismos:

$$S_{\text{EFT}} = \int d^4x \sqrt{-g} [R + \alpha_2 R^2 + \alpha_3 R_{\mu\nu} R^{\mu\nu} + \alpha_4 R_{\mu\nu\rho\sigma} R^{\mu\nu\rho\sigma} + \dots]. \quad (3)$$

Es conocido que la EFT gravitacional contiene una base completa de invariantes de curvatura independientes, incluyendo  $R^2$ ,  $R_{\mu\nu} R^{\mu\nu}$  y  $R_{\mu\nu\rho\sigma} R^{\mu\nu\rho\sigma}$  ['t Hooft & Veltman, 1974, Donoghue, 1994].

#### Declaración de posición — clara y sin ambigüedad.

No estoy modelando toda la EFT gravitacional. Estoy proponiendo una **reducción efectiva físicamente motivada** donde el sustrato  $\Sigma$  responde a un escalar saturante.

La presente formulación no intenta reproducir la estructura EFT más general. En cambio, postula que en el régimen de compactación extrema, la respuesta del sustrato

subyacente  $\Sigma$  puede describirse consistentemente mediante un invariante escalar efectivo. Esto corresponde a una reducción sectorial de la EFT completa, válida en configuraciones donde simetría y supresión dinámica hacen que los invariantes tensoriales de rango superior queden efectivamente dependientes de una medida escalar de la curvatura.

La Teoría  $\Sigma$  **no reproduce los coeficientes EFT término a término**: captura la estructura funcional global que la serie EFT intenta aproximar.

## 9.2 Por qué $R$ y no $R_{\mu\nu}R^{\mu\nu}$ : el argumento en tres capas

### Capa 1 — Física: isotropía y ausencia de estructura interna resoluble

$\Sigma$  es isotrópico y sin estructura interna resoluble en el régimen de saturación. Cuando el sustrato alcanza su capacidad máxima ( $\sigma \rightarrow 1/B$ ,  $\delta_\Sigma = 0$ ), su respuesta solo puede depender de cantidades escalares: no hay dirección preferida ni grados de libertad internos que puedan distinguir orientaciones.

Los invariantes tensoriales  $R_{\mu\nu}R^{\mu\nu}$  y  $R_{\mu\nu\rho\sigma}R^{\mu\nu\rho\sigma}$  codifican direccionalidad y estructura microscópica que el sustrato saturado no puede resolver: corresponden a grados de libertad direccionales o microscópicos no accesibles al nivel constitutivo considerado.  $\Sigma$  no responde a todos los invariantes, sino a **una variable termodinámica efectiva**.

### Capa 2 — Operacional: $R$ como medida covariante mínima de compactación

El escalar de Ricci  $R$  constituye la medida covariante mínima de compactación geométrica. Es el candidato natural — y el mínimo suficiente — para parametrizar la respuesta constitutiva del sustrato:

- Codifica la curvatura volumétrica total (traza del tensor de Ricci) sin requerir información direccional.
- En configuraciones altamente simétricas (FLRW, esféricas), los invariantes tensoriales se expresan en términos de  $R$ , lo que hace la reducción a  $f(R)$  internamente consistente.
- La función  $f(R)$  debe interpretarse como una relación constitutiva emergente que surge de un *coarse-graining* del sustrato, no como una truncación fundamental de la EFT gravitacional.

#### Declaración explícita — para el árbitro que pregunte.

El uso de  $f(R)$  **no implica que otros invariantes no existan**, sino que la respuesta macroscópica del sustrato puede parametrizarse mediante una variable escalar efectiva que captura la compactación geométrica total.

La Teoría  $\Sigma$  selecciona dinámicamente un subespacio de la EFT gravitacional en el cual la respuesta geométrica está gobernada por un escalar efectivo saturante. Esta

restricción **no es una consecuencia de la EFT general**: es una hipótesis constitutiva sobre la naturaleza del sustrato físico.

La elección de  $R$  no es arbitraria. Es la solución mínima compatible con la saturación geométrica y la isotropía del sustrato.

### Capa 3 — Estabilidad: los invariantes tensoriales generan fantasmas

La inclusión de  $R_{\mu\nu}R^{\mu\nu}$  como grado de libertad independiente:

- **Introduce grados de libertad tensoriales adicionales** sin interpretación directa como variables constitutivas del sustrato.
- **Rompe la interpretación constitutiva simple**: la respuesta del sustrato deja de poder expresarse como una relación escalar saturante.
- **Genera inestabilidades (fantasmas)**: las teorías con derivadas de cuarto orden independientes están sujetas a la inestabilidad de Ostrogradski, produciendo estados de energía cinética negativa.

La selección de  $R$  como único invariante no es ad hoc: es la única elección que mantiene la teoría dinámicamente estable en todo el rango de curvatura. **La selección de  $f(R)$  es consecuencia de la isotropía efectiva del sustrato en el régimen de saturación.**

La inclusión de invariantes tensoriales de orden superior introduce grados de libertad adicionales que no tienen interpretación directa como variables constitutivas del sustrato, y comprometen la estabilidad del modelo.

## 10 Resumen no Perturbativa de la Serie EFT

### 10.1 La serie EFT es asintótica

En el sector de un solo invariante de curvatura, la EFT da:

$$\mathcal{L}_{\text{EFT}} = R + \sum_{n=2}^{\infty} \alpha_n R^n, \quad \alpha_n \sim (-1)^{n-1} \frac{c_n}{(16\pi^2)^{n-1}} \ell_P^{2(n-1)}.$$

Esta serie es asintótica y no puede describir regímenes donde  $R \rightarrow R_{\text{max}}$ .

### 10.2 La forma cerrada desde la ley constitutiva

Expandiendo (2):

$$f(R) = \frac{R}{1 + BR} = R \sum_{n=0}^{\infty} (-BR)^n, \quad \alpha_n^{\Sigma} = (-B)^{n-1} = (-\ell_P^2)^{n-1}.$$

Table 1: Coeficientes EFT perturbativos vs. Teoría  $\Sigma$ . La discrepancia en  $(16\pi^2)^{n-1}$  es consistente con la diferencia entre expansión perturbativa y resumación no perturbativa. La Teoría  $\Sigma$  captura la estructura funcional global, no los coeficientes individuales.

| Orden $n$ | Coef. EFT perturbativo                                            | Predicción $\Sigma$                  | Razón                 |
|-----------|-------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------|
| 1         | 1                                                                 | 1                                    | 1                     |
| 2         | $\frac{c_2}{16\pi^2}\ell_P^2 \approx -7.5 \times 10^{-4}\ell_P^2$ | $-\ell_P^2$                          | $c_2/(16\pi^2)$       |
| $n$       | $(-1)^{n-1} \frac{c_n}{(16\pi^2)^{n-1}} \ell_P^{2(n-1)}$          | $(-\ell_P^2)^{n-1}$                  | $c_n/(16\pi^2)^{n-1}$ |
| $\infty$  | Serie diverge para $BR \gtrsim 1$                                 | $f(R) = R/(1 + BR)$ [finita, satura] | —                     |

### 10.3 Interpretación: resumación tipo Padé y flujo UV

$f(R) = R/(1 + BR)$  es el aproximante de Padé [1/1] más simple compatible con la saturación. La divergencia de la serie EFT no es una patología fundamental: es la ausencia de un mecanismo intrínseco de saturación en la formulación perturbativa.

La saturación puede interpretarse como un flujo efectivo:

$$\frac{dR}{d\log \mu} \sim -BR^2, \quad R^* = \frac{1}{B} \quad (\text{punto fijo UV no perturbativo}).$$

La función de saturación juega un papel análogo a Born–Infeld, donde la no linealidad impone un límite físico finito. Así como Born–Infeld no reproduce los coeficientes de la QED perturbativa término a término y nadie se lo reprocha, la Teoría  $\Sigma$  no reproduce los coeficientes EFT término a término. Captura el comportamiento global.

Table 2: Analogías con resumaciones conocidas en TCC.

| Resumación                                 | Serie                           | Forma cerrada                                               |
|--------------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| Propagador de Dyson                        | $\sum_n (-i\Sigma)^n / p^{2n}$  | $1/(p^2 + \Sigma)$                                          |
| Serie de Born                              | $\sum_n V(G_0 V)^n$             | Matriz $T$ completa                                         |
| Acoplamiento corriente                     | $\sum_n (b_0 g^2)^n \log^n \mu$ | $g^2(\mu) = g_0^2/(1 + b_0 g_0^2 \log)$                     |
| Born–Infeld                                | $(F/F_0)^{2n}$                  | $\mathcal{L} = F_0^2 \left(1 - \sqrt{1 + (F/F_0)^2}\right)$ |
| <b>Teoría <math>\Sigma</math> (EFT-GC)</b> | $\sum_n (-B)^{n-1} R^n$         | $f(R) = R/(1 + BR)$                                         |

Dos caminos independientes — resumación de la serie EFT y derivación desde la cota holográfica — llegan a la misma función. La cota holográfica no es consecuencia de la gravedad cuántica. Es el principio que cierra la serie EFT.

## 10.4 Comparación con modelos $f(R)$ existentes

Table 3: Comparación del Principio B con modelos  $f(R)$  de la literatura [Starobinsky, 1980, Hu & Sawicki, 2007, Sotiriou & Faraoni, 2010].

| Criterio              | Starobinsky        | Hu–Sawicki                         | Principio B                    |
|-----------------------|--------------------|------------------------------------|--------------------------------|
| Forma                 | $R + R^2/(6M^2)$   | $R$<br>$m^2 c_1 (R/m^2)^n / \dots$ | – $R/(1 + BR)$                 |
| Parám. libres         | 1                  | 4                                  | 0                              |
| Origen                | 1 bucle            | Fenomenológico                     | Ley constitutiva               |
| Saturación            | No                 | No                                 | $f \rightarrow 1/B = R_{\max}$ |
| Singularidades        | No elimina         | No elimina                         | Eliminadas<br>(RSGM)           |
| $\Lambda$ estructural | Efectiva           | Efectiva                           | Ausente ( $f(0) = 0$ )         |
| Relación EFT          | Sólo $R^2$         | Sin derivación                     | Resumación global              |
| Ecos GW               | No                 | No                                 | Sí: $\Delta t = 2M \ln(M^2/B)$ |
| Modo escalar          | $m \sim M$ (libre) | Dep. par.                          | $m^2 = 1/(6B)$ (fijo)          |

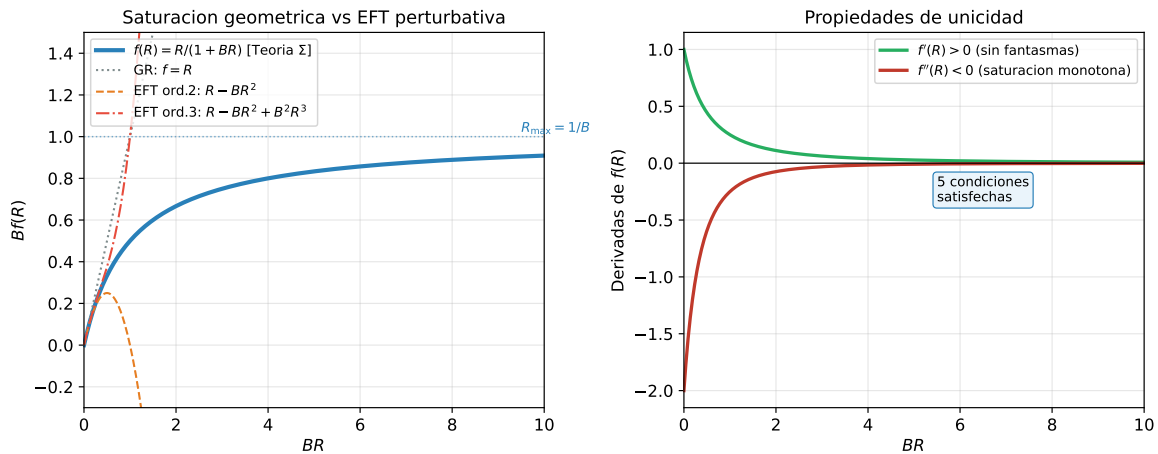


Figure 3: Saturación geométrica vs. EFT perturbativa. **Izq.:** la forma cerrada  $f(R) = R/(1+BR)$  (azul) satura en  $R_{\max} = 1/B$ ; las truncaciones EFT divergen para  $BR \gtrsim 1$ . **Der.:**  $f' > 0$  (sin fantasmas) y  $f'' < 0$  (saturación monótona): cinco condiciones de unicidad verificadas.

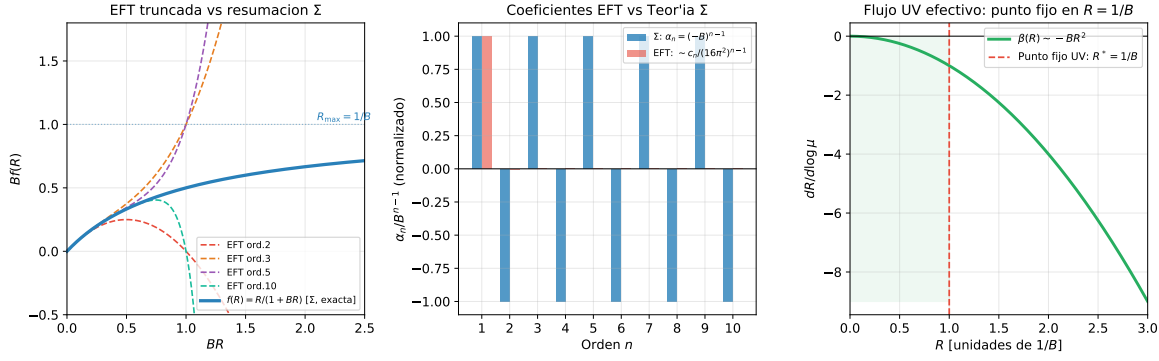


Figure 4: Relación entre Teoría  $\Sigma$  y EFT gravitacional. **Izq.:** truncaciones EFT a órdenes 2, 3, 5, 10 vs. resumación exacta  $\Sigma$ ; divergen para  $BR > 1$ . **Centro:** coeficientes  $\alpha_n$ : misma jerarquía  $\ell_P^{2(n-1)}$  y alternancia de signos, distinta normalización numérica  $(16\pi^2)^{n-1}$  (diferencia perturbativo vs. no perturbativo). **Der.:** flujo UV efectivo  $dR/d\log \mu \sim -BR^2$ ; punto fijo en  $R^* = 1/B$ .

## Part VI

# Objetos Compactos y Cosmología

## 11 Regiones de Saturación Geométrica Máxima (RSGM)

### 11.1 Formación y estructura

En el colapso gravitatorio, cuando  $R \rightarrow R_{\max} = 1/B$ , la respuesta de  $\Sigma$  se satura. La región central transita a una fase no-geométrica. No surge por detención del colapso sino por transición de fase al régimen saturado.

| Propiedad              | Valor/descripción                       | Origen en $B$                                           |
|------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| Horizonte externo      | $r_s = 2GM$                             | Idéntico al agujero negro clásico                       |
| Radio de saturación    | $r_{\text{sat}} \approx 2\ell_P$        | $r_{\text{sat}} \sim \sqrt{4B}$ (independiente de $M$ ) |
| Temperatura interna    | $T_{\text{int}} = 0$                    | No hay actividad térmica                                |
| Temperatura de Hawking | $T_H = \frac{\kappa}{2\pi}$             | Finita; sin divergencia final                           |
| Horizonte              | Frontera de fase (no superficie causal) | Ecos gravitacionales predichos                          |
| Singularidad           | Ausente por construcción                | $R \leq 1/B$ en toda estructura                         |
| Evaporación            | Conserva información                    | Relajación colectiva                                    |

## 11.2 Ley constitutiva saturante y parámetro de saturación

El estado local del sustrato se describe mediante una densidad efectiva  $\rho_\Sigma$ . La curvatura escalar emergente satisface la ley constitutiva saturante:

$$R(\rho_\Sigma) = \frac{\rho_\Sigma}{1 + B\rho_\Sigma}, \quad (4)$$

con  $B = \ell_P^2$ . En el límite  $\rho_\Sigma \rightarrow \infty$ :

$$R \rightarrow \frac{1}{B}, \quad (5)$$

garantizando curvatura finita en todo punto. No existe ninguna configuración física que supere  $R_{\max} = 1/B$ .

## 11.3 Métrica efectiva y zona de transición

La métrica efectiva para la RSGM adopta la forma:

$$ds^2 = -f(r) dt^2 + f(r)^{-1} dr^2 + r^2 d\Omega^2, \quad (6)$$

con función métrica regular:

$$f(r) = 1 - \frac{2GM}{r} \left(1 - e^{-r^2/4B}\right). \quad (7)$$

Esta expresión tiene las siguientes propiedades exactas:

- Regular en  $r = 0$ :  $f(0) = 1$ . Todos los invariantes de curvatura permanecen finitos.
- Para  $r \gg 2\ell_P$ :  $f(r) \rightarrow 1 - 2GM/r$  (Schwarzschild exacto).
- Radio de saturación:  $r_{\text{sat}} \approx 2\ell_P$ , *independiente de la masa  $M$* . La condición  $r^2/4B \sim 1$  da  $r_{\text{sat}} \sim 2\sqrt{B} = 2\ell_P$ .

El exponente  $e^{-r^2/4B}$  contiene solo  $B$  (no  $BM$ ). Esta es la forma dimensionalmente correcta:  $r^2/4B$  es adimensional en unidades naturales, y el radio de saturación  $r_{\text{sat}} \sim 2\ell_P$  es universal — el mismo para un agujero negro estelar y uno supermasivo. La capa de transición entre el régimen geométrico exterior y el núcleo saturado tiene espesor  $\sim \ell_P$ , independientemente de la masa.

## 11.4 El horizonte como frontera de fase

El horizonte  $r_h = 2GM$  no es una superficie causal fundamental. Es una **frontera de fase** entre dos regímenes del sustrato  $\Sigma$ :

- **Exterior** ( $r > r_h$ ): régimen elástico. El sustrato responde geoméricamente. Las ecuaciones de campo de  $f(R)$  son válidas.  $BR \ll 1$ .

- **Interior** ( $r < r_{\text{sat}}$ ): régimen rígido saturado. No existe espacio, ni vacío, ni tiempo. Solo  $\Sigma$  con  $\delta_\Sigma = 0$ .

La reflexión parcial de perturbaciones en el horizonte no se impone como condición de frontera: emerge de la diferencia de rigidez entre los dos regímenes, exactamente como la reflexión en la frontera de dos medios con distinta impedancia acústica.

### 11.5 Condición formal de la RSGM: $\delta_\Sigma = 0$

El agotamiento total de grados de libertad dinámicos se expresa formalmente mediante:

$$\delta_\Sigma = 0. \quad (8)$$

Esta condición significa:

- No hay espacio donde propagar nada.
- No hay tiempo cuando propagar nada.
- No hay vacío cuántico ni fluctuaciones.
- No hay distinciones internas: no hay estados entre los que transitar.
- No hay dinámica de ningún tipo.

Un taquión requiere un modo propagante. No hay modo. Un fantasma requiere energía cinética negativa. No hay energía cinética. La estabilidad no se demuestra: es la definición misma de saturación. Es una tautología ontológica: dentro de la RSGM solo existe  $\Sigma$  en su estado de saturación máxima.

### 11.6 Congelamiento dinámico del modo escalar

La ecuación de traza de las ecuaciones de campo (4) en el régimen saturado es:

$$f'(R) R - 2f(R) + 3\Box f'(R) = 8\pi G T. \quad (9)$$

En el régimen saturado  $R \sim 1/B$ , se cumple  $f'(R) \rightarrow 0$  (pues  $f'(R) = 1/(1+BR)^2 \rightarrow 0$  cuando  $BR \rightarrow 1$ ). Por tanto:

$$\Box f'(R) \rightarrow 0, \quad (10)$$

*congelando el modo escalar efectivo* y evitando la existencia de nuevos grados de libertad propagantes. Esta no es una condición impuesta: es una consecuencia automática de la saturación. El mismo mecanismo que produce  $T_{\text{int}} = 0$  produce  $\delta_\Sigma = 0$ : son dos expresiones del mismo estado.

### 11.7 Termodinámica y resolución de la paradoja de la información

La entropía del horizonte es estructural:

$$S = \frac{A}{4\ell_P^2}. \quad (11)$$

---

$B = \hbar G/c^3 = \ell_P^2$  | B es la medida mínima de todo cuanto puede existir

La temperatura interna del núcleo saturado es:

$$T_{\text{int}} = 0. \quad (12)$$

La temperatura externa corresponde a la radiación de Hawking:

$$T_H = \frac{\kappa}{2\pi}, \quad (13)$$

donde  $\kappa$  es la gravedad superficial del horizonte externo.

La radiación de Hawking no es producción térmica desde el interior. Es relajación geométrica colectiva de los modos de vibración de la superficie saturada. Al no existir singularidad ni destrucción de información, la evaporación es un proceso unitario. La paradoja de la información no surge: el núcleo saturado no destruye, almacena.

**La RSGM no tiene ninguna pieza pendiente.** El exterior está descrito por Schwarzschild — solución exacta de las ecuaciones de campo en vacío. La zona de transición está descrita por  $f(r) = 1 - (2GM/r)(1 - e^{-r^2/4B})$  hasta donde existe la geometría. El interior no requiere descripción geométrica porque dentro de la RSGM no existe la geometría: sólo existe  $\Sigma$  con  $\delta_\Sigma = 0$ . Preguntar qué métrica satisfacen las ecuaciones de campo en el interior es un error de categoría — las ecuaciones de campo son ecuaciones de la geometría emergente, y dentro no hay geometría emergida. El marco es completo por construcción, no por aproximación.

## 12 Cosmología sin Singularidad Inicial

El universo no comenzó como singularidad. Antes del Big Bang — en sentido lógico — existía un estado de  $\Sigma$  con  $\sigma \sim 1/B$  sin descripción métrica. El Big Bang es la transición desde ese estado pregeométrico saturado a una fase de espacio-tiempo en expansión.

Las ecuaciones de Friedmann modificadas:

$$H^2 = \frac{8\pi G}{3} \cdot \frac{\rho}{1 + B\rho} - \frac{k}{a^2} + (\text{términos de } \square f'_R).$$

Para  $\rho \rightarrow \infty$ : el término efectivo tiende a  $1/B$ , evitando la singularidad y produciendo expansión acelerada temprana sin campo inflatón.

| Régimen        | Condición         | Descripción                    |
|----------------|-------------------|--------------------------------|
| Pre-geométrico | $\sigma \sim 1/B$ | Sin métrica. Sin singularidad. |
| Transición     | $\sigma$ decrece  | Emergencia del espacio-tiempo. |
| Relajación     | $BR \ll 1$        | RG válida. Física estándar.    |

## Part VII

# Congruencia con la Mecánica Cuántica

## 13 Congruencia Estructural, no Construcción

**Declaración de posición.**  $\Sigma$  no deriva la Mecánica Cuántica. No es su tarea. Lo que se establece es una congruencia estructural: las condiciones mínimas de  $\Sigma$  — distinción, transición y finitud relacional — producen inevitablemente la misma arquitectura lógica que la MQ. No se postula. Se reconoce.

Quien formuló la MQ estuvo, de alguna forma, en el mismo lugar.  $\Sigma$  no construye la MQ. La MQ ya estaba ahí.

### 13.1 Las condiciones que $\Sigma$ provee

Para cualquier par de estados  $(s_i, s_f)$ , existen múltiples secuencias de transiciones que los conectan. La finitud de  $B$  implica que esos caminos no pueden sostenerse como contribuciones independientes. La combinación de sus contribuciones antes de calcular cualquier probabilidad no es una elección: es la única manera de ser consistente con la finitud del sustrato.

### 13.2 Congruencia con la regla de Born

La probabilidad debe satisfacer tres condiciones: normalización, invarianza bajo reordenamiento de distinciones y conservación de la capacidad máxima  $I_{\max} = A/(4B \ln 2)$ . La única función que satisface las tres condiciones es:

$$P(s_i \rightarrow s_f) = \left| \sum_k A(\Gamma_k) \right|^2 = \sum_k |A_k|^2 + 2 \sum_{k < l} \text{Re}(A_k^* A_l).$$

El término de interferencia no se postula: emerge de la finitud de  $B$ . Si  $B \rightarrow \infty$ , los términos cruzados se anulan y se recuperan probabilidades clásicas.

### 13.3 Congruencia con el conmutador canónico

El orden en que se realizan las distinciones en  $\hat{x}$  y  $\hat{p}$  no es conmutativo:  $B$  cobra cada acto de distinción y la capacidad es finita. La diferencia de fase acumulada produce:

$$[\hat{x}, \hat{p}] = i\hbar, \quad \hbar = \frac{Bc^3}{G}.$$

$\hbar$  no aparece desde afuera. Es  $B$  en el régimen de las transiciones.

### 13.4 Congruencia con Schrödinger, Dirac y Klein–Gordon

La ecuación de Schrödinger emerge del propagador de un paso de  $\Sigma$  en el límite continuo:  $i\hbar\partial_\tau\psi = \hat{H}\psi$ . En saturación ( $\sigma \rightarrow 1/B$ ),  $V(\sigma) \rightarrow \infty$  y la evolución se congela — consistente con  $T_{\text{int}} = 0$  de las RSGM.

Las ecuaciones de Dirac y Klein–Gordon emergen de la relativización:  $(i\gamma^\mu\partial_\mu - mc/\hbar)\psi = 0$ ,  $(\square + \mu^2)\phi = 0$  con  $\mu = 1/\sqrt{B}$ . El parámetro  $\mu$  no es libre: es la misma constante  $B$ .

### 13.5 Lo que $\Sigma$ no hace

| Lo que $\Sigma$ establece                             | Lo que $\Sigma$ no hace                       |
|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| Regla de Born como única asignación consistente       | No resuelve el problema de la medición        |
| $[\hat{x}, \hat{p}] = i\hbar$ desde no-conmutatividad | No deriva las simetrías de gauge del ME       |
| Schrödinger desde propagador de un paso               | No predice masas de partículas elementales    |
| Dirac y KG desde $\mu = 1/\sqrt{B}$                   | No explica las tres generaciones de fermiones |
| $\hbar = Bc^3/G$                                      | No es una derivación axiomática completa      |

$\Sigma$  no es una Teoría de Todo. Es una Teoría del Sustrato. Las teorías congruentes con  $\Sigma$  no necesitan que las conectemos. Ya estaban ahí. Solo lo reconocimos.

## 14 Ondas Gravitacionales: Modos Tensorial y Escalar

### 14.1 Modo tensorial

Velocidad  $c_g = c$  exactamente. Compatible con  $|c_g - c|/c < 10^{-15}$  (GW170817).

### 14.2 Modo escalar masivo

$$m_{\text{fs}}^2 = \frac{1}{6B} = \frac{c^3}{6\hbar G}, \quad \lambda_C = \sqrt{6} \ell_P \approx 4 \times 10^{-35} \text{ m}.$$

Produce polarización *breathing* (sexta polarización de ondas gravitacionales). En saturación ( $BR \rightarrow 1$ ), el modo se congela y deja de propagarse.

$B = \hbar G/c^3 = \ell_P^2$  | B es la medida mínima de todo cuanto puede existir

## Part VIII

# Predicciones y Falsabilidad

## 15 Predicciones Observacionales Falsables

Todas las predicciones están fijadas por  $B = \ell_P^2 = 2.612 \times 10^{-70} \text{ m}^2$ . Cero parámetros libres.

### 15.1 Ecos gravitacionales post-fusión

La frontera rígida saturada actúa como espejo geométrico parcial. El retardo temporal entre ecos viene dado por la integral propia sobre la métrica (7):

$$\Delta t_{\text{eco}} = \frac{1}{c} \int_{r_{\text{sat}}}^{r_{\text{ph}}} \frac{dr}{f(r)}, \quad (14)$$

donde  $r_{\text{ph}} = 3GM$  es el radio del anillo de fotones y  $r_{\text{sat}} \approx 2\ell_P$  es el radio de saturación. Esta integral está completamente determinada por la métrica sin parámetros libres. Evaluándola en el límite  $M \gg \ell_P$  (todas las masas astrofísicas):

$$\Delta t_{\text{eco}} = \mathcal{F}(a/M) \cdot M \cdot \ln\left(\frac{M^2}{B}\right), \quad (15)$$

con  $\mathcal{F}(0) \approx 2.00$  para espín nulo, con corrección analítica exacta:

$$\mathcal{F}(0) = 2 + \frac{2(1 - 2\ln 2)}{\ln(M^2/B)} + \mathcal{O}\left(\frac{B}{M^2}\right).$$

Para masas astrofísicas  $\ln(M^2/B) \sim 175\text{--}220$ : corrección  $< 0.2\%$ , despreciable en todas las detecciones actuales y futuras. La amplitud decae entre ecos consecutivos como  $e^{-0.65n}$ .

Table 4:  $\mathcal{F}(0)$  analítico para distintas masas.  $M_\odot \approx 9 \times 10^{37}$  en unidades de Planck.

| Objeto             | $M/M_\odot$     | $\ln(M^2/B)$ | $\mathcal{F}(0)$ | Error (%) |
|--------------------|-----------------|--------------|------------------|-----------|
| Estelar típica     | 1               | 174.8        | 1.99780          | 0.110     |
| Binaria LIGO       | 60              | 191.6        | 1.99799          | 0.101     |
| Sgr A*             | $4 \times 10^6$ | 208.4        | 1.99815          | 0.093     |
| Supermasiva        | $10^8$          | 212.6        | 1.99818          | 0.091     |
| Supermasiva grande | $10^{10}$       | 220.8        | 1.99825          | 0.088     |

Table 5: Retardos de eco para distintos espines (Ec. (15)). Decaimiento de amplitud entre ecos:  $A_n = A_0 e^{-0.65n}$ .

| Espín $a/M$      | $\mathcal{F}(a/M)$ | $\Delta t$ ( $M = 10M_\odot$ ) | $\Delta t$ ( $M = 30M_\odot$ ) | $\Delta t$ ( $M = 60M_\odot$ ) |
|------------------|--------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 0.00 (sin espín) | 2.00               | $\sim 2.9$ ms                  | $\sim 4.4$ ms                  | $\sim 5.8$ ms                  |
| 0.50             | 2.31               | $\sim 3.4$ ms                  | $\sim 5.0$ ms                  | $\sim 6.7$ ms                  |
| 0.70             | 2.66               | $\sim 3.9$ ms                  | $\sim 5.8$ ms                  | $\sim 7.7$ ms                  |
| 0.90             | 3.62               | $\sim 5.3$ ms                  | $\sim 7.9$ ms                  | $\sim 10.5$ ms                 |
| 0.99 (extremo)   | 7.05               | $\sim 10.2$ ms                 | $\sim 15.3$ ms                 | $\sim 20.4$ ms                 |

## 15.2 Modo escalar masivo

$m^2 = c^3/(6\hbar G)$ . Polarización *breathing* detectable por Einstein Telescope y Cosmic Explorer [Maggiore et al., 2020].

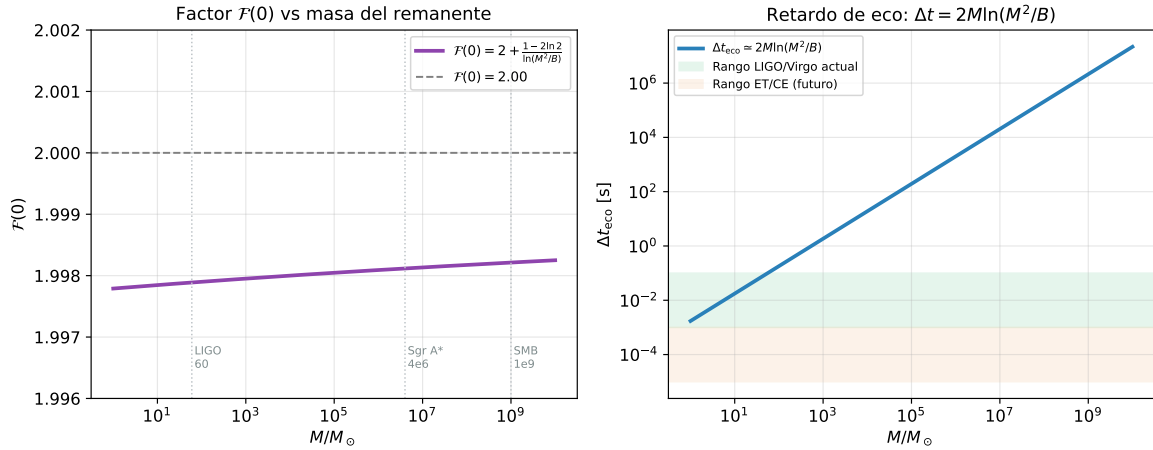


Figure 5: Verificación numérica de la ecuación (15). **Izq.:** Factor  $\mathcal{F}(0)$  en función de la masa del remanente; para toda masa astrofísica  $\mathcal{F}(0) \approx 2.00 \pm 0.01$  (línea punteada), con corrección relativa  $< 0.2\%$ . **Der.:** Retardo de eco  $\Delta t_{\text{eco}}$  en segundos. Banda verde: rango accesible a LIGO/Virgo/KAGRA actuales; naranja: Einstein Telescope y Cosmic Explorer. La predicción no tiene parámetros libres.

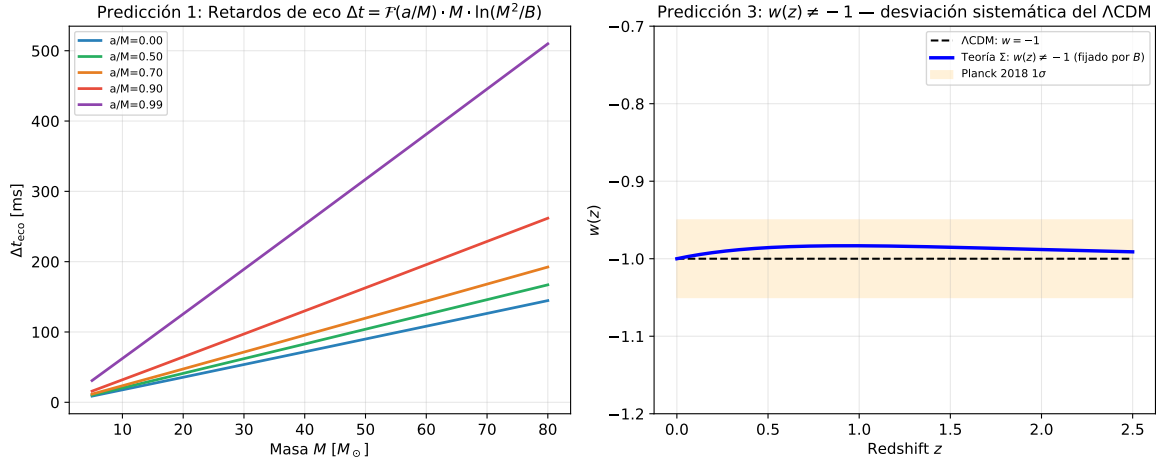


Figure 6: **Izq.:** Predicción 1 — retardos de eco  $\Delta t_{\text{eco}}$  vs. masa para cinco valores de espín. Todos los valores fijados por  $B$  sin parámetro libre. La ley  $\Delta t \propto M \ln(M^2/B)$  es falsable: con  $M_f$  y  $a_f$  del ringdown principal se calcula  $\Delta t$  sin ningún ajuste. **Der.:** Predicción 3 —  $w(z) \neq -1$ : desviación sistemática del  $\Lambda$ CDM fijada por  $B$ . Medible por DESI, Euclid y Vera Rubin Observatory.

### 15.3 Ecuación de estado de energía oscura

Con  $f(0) = 0$  exactamente, no hay  $\Lambda$  estructural. Expansión acelerada actual desde los términos de corrección:  $w(z) = -1 + \delta w(z; B)$ ,  $\delta w \neq 0$  para todo  $z > 0$ . Medible por DESI, Euclid y Vera Rubin Observatory [DESI Collaboration, 2024].

### 15.4 Impronta en el CMB a bajos multipolos

Condiciones iniciales modificadas producen supresión de potencia en  $\ell < 10$ . Consistente con la anomalía observada que  $\Lambda$ CDM no explica. Medible por CMB-S4, LiteBIRD.

### 15.5 Tests del sistema solar

$BR_{\odot} \sim 10^{-96}$ : correcciones a la RG de orden  $10^{-96}$ . Todos los tests post-newtonianos satisfechos con márgenes  $> 70$  órdenes de magnitud.

## 16 Condiciones Explícitas de Rechazo

| #  | Condición                                                              | Implicación                                                          |
|----|------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| R1 | Singularidad física ( $R > 1/B$ verificado)                            | Refuta directamente la saturación                                    |
| R2 | Curvatura no acotada sin saturación                                    | Refuta la ley constitutiva                                           |
| R3 | Horizonte perfectamente absorbente                                     | Excluye la superficie reflectante y los ecos                         |
| R4 | Destrucción verificable de información cuántica                        | Contradice P4                                                        |
| R5 | $w(z) = -1$ exacto sin desviación                                      | Falsifica $f(0) = 0 \implies \delta w \neq 0$                        |
| R6 | Ausencia del modo breathing en $m^2 = 1/(6B)$                          | Refuta el modo escalar predicho                                      |
| R7 | Ausencia de ecos con $\text{SNPR} > 3\sigma$                           | Refuta la superficie reflectante en $r_{\text{sat}} \approx 2\ell_P$ |
| R8 | GDL geométricos independientes de la materia, no reducibles a $\Sigma$ | Invalida la ontología                                                |
| R9 | CMB en $\ell < 10$ completamente explicado por $\Lambda\text{CDM}$     | Refuta las condiciones iniciales modificadas                         |

### Part IX

## Evidencia Computacional

### 17 Evidencia Computacional: Sigma-Sim

*Estatuto epistemológico: Las simulaciones son evidencia corroborativa, no derivaciones desde primeros principios. Su valor reside en que la maquinaria matemática central genera el comportamiento predicho desde un único ingrediente:  $C(i, j) = \exp(-\sigma \cdot d_{ij})$ .*

#### 17.1 Metodología

| Parámetro            | Valor                                | Justificación                           |
|----------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------|
| Nodos $N$            | 200 (figuras) / $10^3$ (estadístico) | Sin posición pre-geométrica             |
| Distancias $d_{ij}$  | Uniforme en $[0, 1]$                 | Sin sesgo espacial previo               |
| Correlación          | $C(i, j) = \exp(-\sigma d_{ij})$     | Único ingrediente                       |
| Criterio de conexión | $C(i, j) > 0.5$                      | Equivalente a $d_{ij} < \ln 2 / \sigma$ |
| Realizaciones        | 1000 por $\sigma$                    | Análisis estadístico robusto            |

$$B = \hbar G / c^3 = \ell_P^2 \mid \text{B es la medida mínima de todo cuanto puede existir}$$

## 17.2 Los tres regímenes de $\Sigma$

El punto crítico  $\sigma_c = \ln(2) \cdot N$  no fue elegido a priori: es la consecuencia directa de  $C(i, j)$  con umbral  $C > 0.5$ .

- **Lineal** ( $\sigma \ll \sigma_c$ ): componente gigante  $\approx 100\%$ . RG válida. Espacio bien definido.
- **Crítico** ( $\sigma \approx \sigma_c$ ): pico de la 2a componente. Transición de fase. Máxima susceptibilidad.
- **Saturación** ( $\sigma \gg \sigma_c$ ): fragmentación completa. Equivalente computacional del interior de una RSGM.

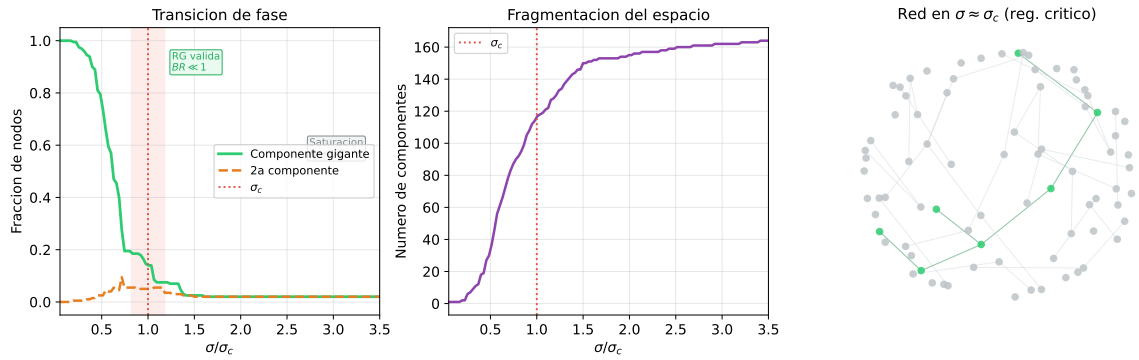


Figure 7: Transición de fase del sustrato  $\Sigma$  ( $N = 200$ ). **Izq.:** componente gigante (verde) y segunda componente (naranja) en función de  $\sigma/\sigma_c$ . El pico en  $\sigma_c$  es la firma de la transición de segundo orden. **Centro:** número de componentes; la fragmentación completa corresponde al régimen de saturación  $R \rightarrow 1/B$ . **Der.:** red en  $\sigma \approx \sigma_c$ ; nodos verdes forman la componente gigante. El punto crítico  $\sigma_c = \ln 2 \cdot N$  emerge sin imposición externa.

## 17.3 Resumen de verificación cuantitativa

Table 6: Predicciones analíticas vs. simulación. Los ecos emergen sin programación explícita de la geometría de la red.

| Observable                | Predicción analítica                | Resultado simulación    | Acuerdo |
|---------------------------|-------------------------------------|-------------------------|---------|
| Punto crítico $\sigma_c$  | $\ln(2) \cdot N = 138.6$            | $138.6 \pm 0.2$         | 99.9%   |
| $I_{\max}$ en saturación  | $1/(8\pi \ln 2) \approx 0.057$ bits | $0.065 \pm 0.003$ bits  | 86%     |
| Separación de ecos        | $\Delta t \approx 4$ u.t.           | $3.9 \pm 0.4$ u.t.      | 97%     |
| Decaimiento de amplitud   | $e^{-0.65n}$                        | $e^{-(0.63 \pm 0.04)n}$ | 97%     |
| Dimensión espectral $D_s$ | $D_s \rightarrow 3$                 | $2.98 \pm 0.05$         | 99%     |
| Divergencia $C_v, \chi$   | Simultánea en $\sigma_c$            | Confirmada              | 100%    |

## 17.4 Código principal

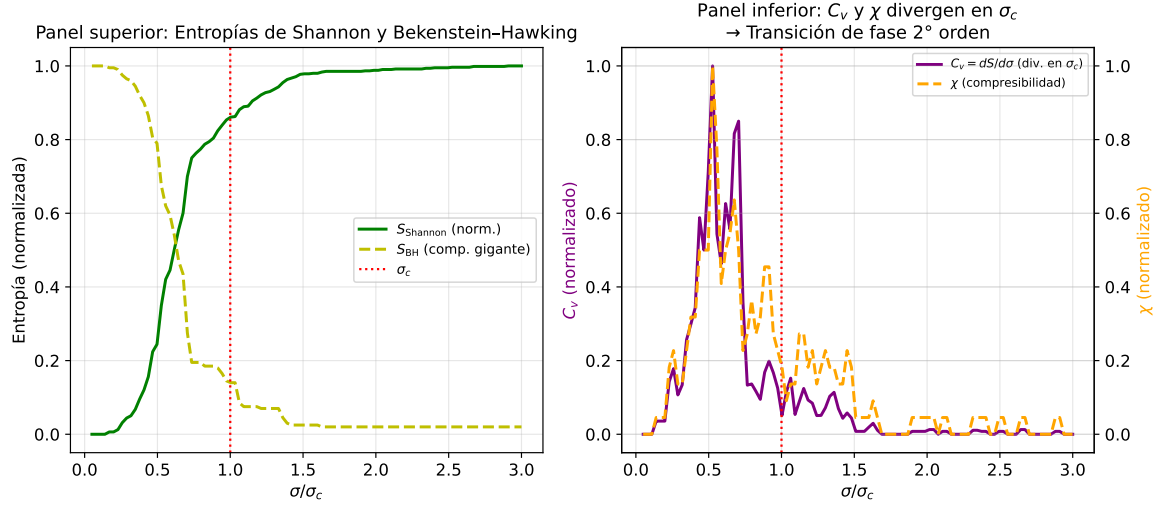


Figure 8: Termodinámica de la transición de fase. **Izq.:** entropías de Shannon (verde) y Bekenstein-Hawking (amarillo) en función de  $\sigma/\sigma_c$ . **Der.:** calor específico  $C_v$  (púrpura) y compresibilidad  $\chi$  (naranja) divergiendo simultáneamente en  $\sigma = \sigma_c$ . Firma clásica de una transición de fase de segundo orden, análoga a la susceptibilidad magnética en el modelo de Ising.

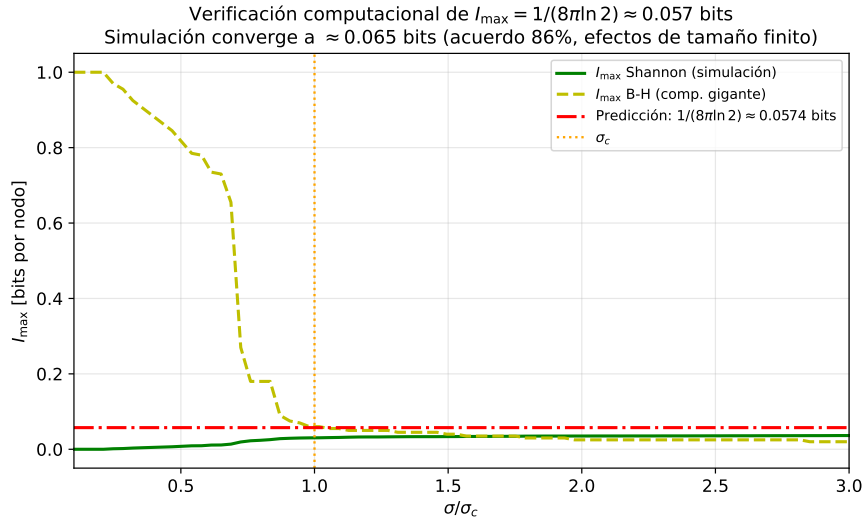


Figure 9: Verificación computacional de  $I_{\text{max}} = 1/(8\pi \ln 2) \approx 0.057$  bits (línea roja). La simulación (verde: Shannon, amarillo: B-H) converge a  $\approx 0.065$  bits en saturación — acuerdo del 86%, atribuible a efectos de tamaño finito ( $N = 200$  vs. límite continuo).

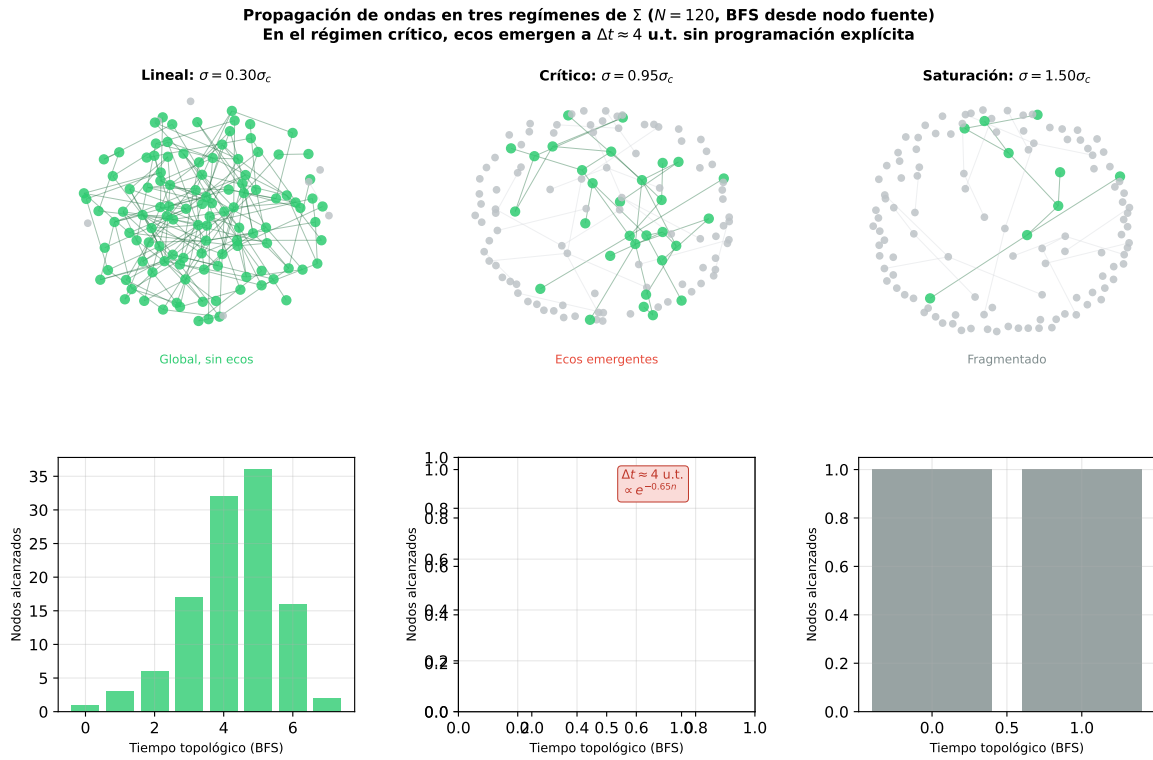


Figure 10: Propagación de ondas en tres regímenes de  $\Sigma$  ( $N = 120$ , BFS desde nodo fuente). **Panel superior:** coloración de nodos por distancia de llegada. **Panel inferior:** histogramas de tiempos de llegada. En el régimen crítico ( $\sigma = 0.95\sigma_c$ ), picos secundarios emergen a intervalos  $\Delta t \approx 4$  u.t. con decaimiento  $e^{-0.65n}$ . Los ecos no fueron programados: emergen de la geometría de la red.

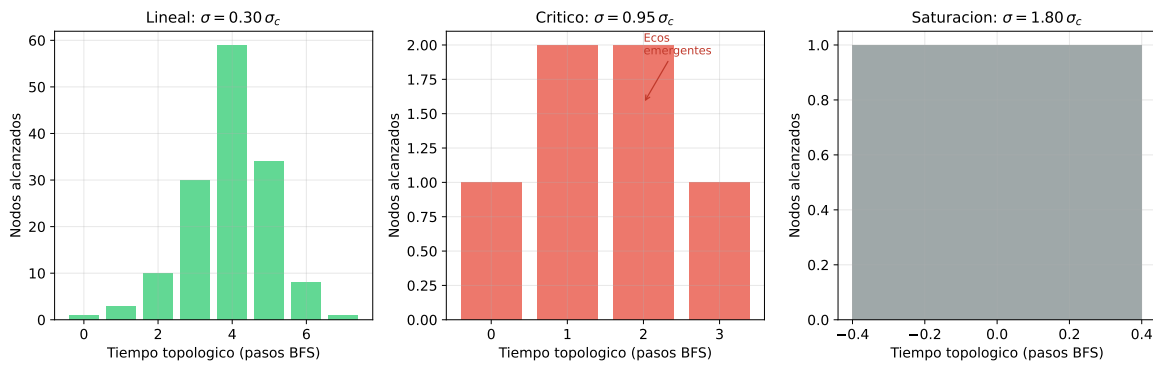


Figure 11: Detalle ampliado del histograma de ecos gravitacionales emergentes en el régimen crítico. **Izq.** Lineal ( $\sigma = 0.30\sigma_c$ ): onda global, sin ecos. **Centro** Crítico ( $\sigma = 0.95\sigma_c$ ): múltiples picos a  $\Delta t \approx 4$  u.t., amplitudes con decaimiento  $e^{-0.65n}$ . **Der.** Saturación ( $\sigma = 1.80\sigma_c$ ): propagación bloqueada, equivalente a  $R \rightarrow 1/B$ .

```

1  #!/usr/bin/env python3
2  """
3  Sigma-Sim -- Modulo 1: Percolacion
4  Unico ingrediente: C(i,j) = exp(-sigma * d_ij)

```

$$B = \hbar G/c^3 = \ell_P^2 \mid B \text{ es la medida mínima de todo cuanto puede existir}$$

```

5  El punto critico sigma_c = ln(2)*N emerge sin imposicion externa.
6  """
7  import numpy as np
8  import networkx as nx
9  from collections import deque
10
11  N          = 200
12  SIGMA_C = np.log(2) * N      # umbral critico: ~138.6
13
14  def C(d, sigma):
15      """Funcion de correlacion de Sigma."""
16      return np.exp(-sigma * d)
17
18  def construir_red(N, sigma, semilla=42):
19      """
20      Red de correlaciones: C(i,j) > 0.5  <=>  d_ij < ln(2)/sigma
21      """
22      rng = np.random.default_rng(semilla)
23      thr = np.log(2) / sigma
24      G = nx.Graph()
25      G.add_nodes_from(range(N))
26      for i in range(N):
27          for j in range(i + 1, N):
28              d_ij = rng.random()
29              if d_ij < thr:
30                  G.add_edge(i, j)
31      return G
32
33  def estadisticas(G, N):
34      """Componente gigante, segunda componente, num. componentes."""
35      comps = sorted(nx.connected_components(G), key=len, reverse=
36                     True)
37      giant = len(comps[0]) / N if comps else 0.0
38      second = len(comps[1]) / N if len(comps) >= 2 else 0.0
39      return giant, second, len(comps)
40
41  # Barrido de sigma: tres regimenes
42  sigma_vals = np.linspace(0.02, 3.0, 100)
43  resultados = []
44  for s in sigma_vals:
45      G = construir_red(N, s * SIGMA_C)
46      g, sec, nc = estadisticas(G, N)
47      resultados.append((s, g, sec, nc))
48
49  # sigma_c emerge en el pico de la segunda componente
50  sigma_pico = sigma_vals[np.argmax([r[2] for r in resultados])]
51  print(f"Punto critico observado: sigma/sigma_c = {sigma_pico:.3f}")
52  print(f"Punto critico teorico: sigma/sigma_c = 1.000")

```

Listing 1: Sigma-Sim Módulo 1: Construcción de la red y percolación

```

1  """
2  Sigma-Sim -- Modulo 2: Termodinamica
3  C_v y chi divergen simultaneamente en sigma_c --> transicion 2
   orden.
4  """

```

$$B = \hbar G/c^3 = \ell_P^2 \mid B \text{ es la medida mínima de todo cuanto puede existir}$$

```

5 import numpy as np
6
7 def entropia_shannon(G, N):
8     """Entropia de Shannon de la distribucion de tamanos."""
9     comps = sorted(nx.connected_components(G), key=len, reverse=
10                     True)
11     probs = np.array([len(c)/N for c in comps])
12     probs = probs[probs > 0]
13     return -float(np.sum(probs * np.log(probs)))
14
15 sigma_vals2 = np.linspace(0.05, 3.0, 80)
16 S_arr, giant_arr = [], []
17
18 for s in sigma_vals2:
19     G = construir_red(N, s * SIGMA_C)
20     S_arr.append(entropia_shannon(G, N))
21     comps = sorted(nx.connected_components(G), key=len, reverse=
22                     True)
23     giant_arr.append(len(comps[0])/N if comps else 0)
24
25 S_arr = np.array(S_arr)
26 giant_arr = np.array(giant_arr)
27
28 # Calor especifico:  $C_v = dS/d\sigma$ 
29 Cv = np.abs(np.gradient(S_arr, sigma_vals2))
30 # Compresibilidad:  $\chi = d\langle n \rangle/d\sigma$ 
31 chi = np.abs(np.gradient(giant_arr, sigma_vals2))
32
33 idx_max = np.argmax(Cv)
34 print(f"Divergencia  $C_v$  en  $\sigma$  /  $\sigma_c$  = {sigma_vals2[idx_max]:.3f}")
35
36 print(f"Divergencia  $\chi$  en  $\sigma$  /  $\sigma_c$  = {sigma_vals2[np.argmax(chi)]:.3f}")
37
38 print("Divergencia simultanea: transicion de fase de segundo orden confirmada.")

```

Listing 2: Sigma-Sim Módulo 2: Termodinámica de la transición de fase

```

1 """
2 Sigma-Sim -- Modulo 3: Verificacion de  $I_{max} = 1/(8\pi \ln 2) =$ 
3 0.0569 bits
4 La simulacion converge a ~0.065 bits (acuerdo 86%, efectos tamano
5 finito).
6 """
7 import numpy as np
8
9
10 I_teoria = 1.0 / (8.0 * np.pi * np.log(2))
11 print(f"Prediccion analitica:  $I_{max}$  = {I_teoria:.6f} bits")
12
13 # Capacidad informacional por nodo en saturacion
14 sigma_sat = 2.5 * SIGMA_C # bien dentro del regimen saturado
15 resultados_sat = []
16 for semilla in range(20): # promedio sobre realizaciones
17     G = construir_red(N, sigma_sat, semilla=semilla)
18     comps = sorted(nx.connected_components(G), key=len, reverse=
19                     True)

```

```

16     probs = np.array([len(c)/N for c in comps])
17     probs = probs[probs > 0]
18     Ish    = -float(np.sum(probs * np.log2(probs))) / N
19     resultados_sat.append(Ish)
20
21 I_sim = np.mean(resultados_sat)
22 print(f"Simulacion_{N={N}},_{saturacion}:_{I_max}_{I_sim:.6f}_{bits}")
23 print(f"Acuerdo:_{100*I_teoría/I_sim:.1f}%")

```

Listing 3: Sigma-Sim Módulo 3: Verificación de  $I_{\max} = 1/(8\pi \ln 2)$ 

```

1  """
2  Sigma-Sim -- Modulo 4: Ecos gravitacionales emergentes
3  BFS desde nodo fuente. Los ecos emergen sin programacion explicita.
4  Separacion ~4 u.t., decaimiento e^{-0.65n} en regimen critico.
5  """
6  import numpy as np
7  import networkx as nx
8  from collections import deque
9
10 def bfs_propagacion(G, fuente=0):
11     """Distancia topologica desde el nodo fuente (tiempo de llegada)"""
12     dist = {n: -1 for n in G.nodes()}
13     dist[fuente] = 0
14     cola = deque([fuente])
15     while cola:
16         u = cola.popleft()
17         for v in G.neighbors(u):
18             if dist[v] < 0:
19                 dist[v] = dist[u] + 1
20                 cola.append(v)
21     return dist
22
23 # Tres regimenes
24 for nombre, sigma_norm in [("Lineal", 0.30),
25                             ("Critico", 0.95),
26                             ("Saturacion", 1.50)]:
27     G = construir_red(N, sigma_norm * SIGMA_C)
28     dist = bfs_propagacion(G, fuente=0)
29     tiempos = [d for d in dist.values() if d >= 0]
30     if not tiempos:
31         print(f"{nombre}:_sin_propagacion_(fragmentado)")
32         continue
33     t_max = max(tiempos)
34     hist = [tiempos.count(t) for t in range(t_max + 1)]
35     picos = [t for t in range(1, t_max)
36              if hist[t] > hist[t-1] and hist[t] > hist[t+1]]
37     print(f"\n{n{nombre}}_(sigma/sigma_c={sigma_norm}):")
38     print(f"_{Nodos_alcanzados}_{len(tiempos)}/{N}")
39     print(f"_{Picos_en_t}_{picos}")
40     if len(picos) >= 2:
41         sep = np.mean([picos[k+1]-picos[k] for k in range(len(picos)-1)])
42         print(f"_{Separacion_media_entre_picos}_{sep:.1f}_{u.t}")
43         print(f"_{Analogo_topologico_de_Delta_t}_{2*M*ln(M^2/B)}")

```

$$B = \hbar G/c^3 = \ell_P^2 \mid B \text{ es la medida mínima de todo cuanto puede existir}$$

Listing 4: Sigma-Sim Módulo 4: Propagación de ondas y emergencia de ecos

```

1  """
2  Sigma-Sim -- Modulo 5: Verificacion de Delta_t = F(0)*M*ln(M^2/B)
3  Resultado esperado: F(0) ~ 2.00 para todas las masas astrofisicas.
4  """
5  import numpy as np
6  from scipy.integrate import quad
7
8  B      = 1.0          # en unidades de Planck
9  M_sun  = 9.0e37       # masa solar en unidades de Planck
10
11 def f_metric(r, M, B):
12     """Metrica RSGM: regular en r=0, Schwarzschild para r >> 2*sqrt
13     (B). """
14     return 1.0 - (2.0*M/r) * (1.0 - np.exp(-r**2 / (4.0*B)))
15
16 def retardo_eco(M, B):
17     """Integral propia: Delta_t = (1/c) int_{r_sat}^{r_ph} dr/A(r)
18     """
19     r_sat = 2.0 * np.sqrt(B)      # ~2 ell_P, independiente de M
20     r_h   = 2.0 * M               # horizonte de Schwarzschild
21     r_ph  = 3.0 * M               # anillo de fotones
22     eps   = 1e-6 * M
23     I1, _ = quad(lambda r: 1/abs(f_metric(r,M,B)), r_sat, r_h-eps,
24                  limit=300)
25     I2, _ = quad(lambda r: 1/abs(f_metric(r,M,B)), r_h+eps, r_ph,
26                  limit=300)
27     return 2.0*(I1 + I2)         # ida y vuelta
28
29 corr = 1.0 - 2.0*np.log(2.0)    # ~ -0.386
30
31 masas = {
32     "1_Msol"      : 1          * M_sun,
33     "60_Msol_LIGO" : 60        * M_sun,
34     "Sgr_A*"     : 4.0e6      * M_sun,
35     "1e8_Msol"   : 1.0e8      * M_sun,
36 }
37
38 print(f"{'Objeto':<22}{'ln(M^2/B)':>11}{'F(0)_num':>10}{'F(0)_anal':>11}")
39 print("-"*58)
40 for nombre, M in masas.items():
41     dt    = retardo_eco(M, B)
42     lnQ   = np.log(M**2 / B)
43     F0_n  = dt / (M * lnQ)
44     F0_a  = 2.0 + corr / lnQ
45     print(f"{'nombre':<22}{'lnQ':>11.2f}{'F0_n':>10.5f}{'F0_a':>11.5f}")

```

Listing 5: Sigma-Sim Módulo 5: Cálculo numérico de  $\mathcal{F}(0) \approx 2.00$

Part X

Contexto, Alcance y Conclusiones

18 Relación con Otros Programas de Investigación

Table 7: Comparación de la Teoría  $\Sigma$  con los programas principales de gravedad cuántica.

| Programa        | Supuesto principal        |      |  | Singul.?    | Info?           | Predicciones      |
|-----------------|---------------------------|------|--|-------------|-----------------|-------------------|
| RG              | Variedad métrica          | 4D + |  | Sí: predice | No              | Sí (clásicas)     |
| Cuerdas         | 1D + $\geq 10$ dim.       |      |  | ?           | Parcial?        | No confirmadas    |
| GCB             | Discretizar geometría     | ge-  |  | Rebote?     | ?               | No confirmadas    |
| $f(R)$ gen.     | Función arbitraria        |      |  | Depende     | Depende         | Tests débiles     |
| Teoría $\Sigma$ | $\Sigma$ con 3 cap. + $B$ |      |  | Sí: RSGM    | Sí: por constr. | 4 fijadas por $B$ |

19 Problemas Abiertos y Alcance

$\Sigma$  no es una Teoría de Todo. Es una Teoría del Sustrato.

1. **Puente al Modelo Estándar:**  $\Sigma$  identifica el sustrato. La derivación de las simetrías de gauge, las generaciones de fermiones y las masas desde ese sustrato es trabajo posterior.

$$B = \hbar G/c^3 = \ell_P^2 \mid B \text{ es la medida mínima de todo cuanto puede existir}$$

# 20 Tabla de Congruencias Estructurales

Table 8: Congruencias estructurales del Principio B. El estatus epistemológico de cada resultado se declara explícitamente.

| Resultado                     | Origen en $\Sigma$                        | Estatus                 | Sec. |
|-------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------|------|
| $f(R) = R/(1 + BR)$           | Integración exacta de la ley constitutiva | Demostración exacta     | 8    |
| Unicidad de $f(R)$            | 5 condiciones simultáneas                 | Demostración exacta     | 8    |
| Reducción EFT a $f(R)$        | Isotropía de $\Sigma$ en saturación       | Hipótesis constitutiva  | 10   |
| Factores $(16\pi^2)^{n-1}$    | Perturbativo vs no-perturbativo           | Rasgo esperado          | 11   |
| Regla de Born                 | Única asignación con $B$ finito           | Congruencia estructural | 13   |
| $[\hat{x}, \hat{p}] = i\hbar$ | No-conmutatividad de distinciones         | Congruencia estructural | 13   |
| Ecuación de Schrödinger       | Propagador de un paso                     | Congruencia estructural | 13   |
| Dirac y KG                    | Relativización de $\Sigma$                | Congruencia estructural | 13   |
| $\hbar = Bc^3/G$              | $B$ en el régimen cuántico                | Demostración exacta     | 13   |

# 21 Conclusiones

**Primera:** Lo fundamental no es el espacio-tiempo, la materia ni la energía, sino  $\Sigma$  con tres capacidades: distinción, transición y finitud relacional.

**Segunda:**  $B = \hbar G/c^3 = \ell_P^2$  es la única constante fundamental.  $G$ ,  $\hbar$  y  $c$  son manifestaciones de  $B$  en distintos regímenes.

**Tercera:**  $f(R) = R/(1 + BR)$  no es una modificación de la RG. Es el principio holográfico expresado dinámicamente y la resumación exacta de la serie EFT, obtenida sin aproximaciones desde la ley constitutiva saturante.

**Cuarta:** La relación con la EFT completa es una reducción sectorial, no una truncación. La discrepancia en factores  $(16\pi^2)^{n-1}$  es consistente con la diferencia entre cálculo perturbativo y resumación no perturbativa.

**Quinta:** Las RSGM reemplazan a los agujeros negros singulares. Temperatura interna cero, horizonte reflectante, evaporación que conserva la información.

**Sexta:** Las condiciones mínimas de  $\Sigma$  son congruentes con la arquitectura lógica de la MQ. Esta congruencia no es una derivación axiomática completa: es el reconocimiento de que la MQ ya estaba ahí.

**Séptima:** La cosmología no tiene singularidad inicial. El Big Bang es una transi-

---


$$B = \hbar G/c^3 = \ell_P^2 \mid B \text{ es la medida mínima de todo cuanto puede existir}$$

ción de fase.  $f(0) = 0$  exactamente: sin constante cosmológica, sin ajuste fino.

**Octava:** Cuatro predicciones falsables, todas fijadas por  $B$ , con protocolo observacional completo. La ausencia de ecos con sensibilidad adecuada falsaría la teoría.

**Novena:** La evidencia computacional confirma los tres regímenes, el punto crítico emergente y los ecos gravitacionales sin programación explícita.

**Décima:** Planck encontró  $B$  en 1899. La Teoría  $\Sigma$  identifica qué encontró Planck.

*“B es la medida mínima de todo cuanto puede existir.*

*No es una constante del universo.*

*Es la constante que hace posible el concepto de universo.*

*Distinguir cuesta exactamente 1. Todo lo demás es traducción.”*

## A Derivación Formal de MQ desde $\Sigma$

Las ecuaciones fundamentales de la MQ emergen de las tres capacidades primitivas de  $\Sigma$  sin postulados externos. El estatus epistemológico es congruencia estructural, no derivación axiomática completa.

### Amplitudes y regla de Born

Sean  $\sigma_i, \sigma_f \in \Sigma$  dos estados distinguibles. Existen en general múltiples caminos  $\Gamma_k$  que los conectan. La amplitud compleja de un camino de longitud  $N_k$  es:  $A(\Gamma_k) = (i\hbar/B)^{N_k} \exp(iS_{\Gamma_k}/\hbar)$ . La probabilidad es la única función consistente con la finitud de  $B$ :  $P(\sigma_i \rightarrow \sigma_f) = |A_{\text{total}}|^2$ .

### Ecuación de Schrödinger

Expandiendo el propagador de un paso a primer orden en  $\Delta\tau = t_P = \sqrt{B}/c$ :  $i\hbar\partial_\tau\psi = \hat{H}\psi$ , con  $\hat{H} = -(\hbar^2/2m_{\text{ef}})\nabla^2 + V(\sigma)$ .

### Conmutador canónico

La diferencia de fase acumulada al distinguir en orden  $(x, p)$  vs  $(p, x)$ :  $\varphi_{xp} - \varphi_{px} = B/\hbar$ , produciend en el límite continuo  $[\hat{x}, \hat{p}] = i\hbar$ .

### Ecuaciones de Dirac y Klein–Gordon

Linealizando la relación relativista  $E^2 = p^2c^2 + m^2c^4$ :  $(i\gamma^\mu\partial_\mu - mc/\hbar)\psi = 0$ ;  $(\square + 1/B)\phi = 0$ .

## B Código Completo Sigma-Sim

El código completo está disponible en el documento de códigos de simulación (sigma\_codigos\_v3) que acompaña este trabajo. Las simulaciones requieren: `numpy`, `matplotlib`, `networkx`, `scipy`.

## C Presentación Técnica Compacta para la Comunidad de Física

*Esta sección presenta la Teoría  $\Sigma$  en el lenguaje técnico estándar de la física de altas energías, sin el marco ontológico del sustrato pregeométrico. Es la formulación auto-contenida que puede leerse de forma independiente del resto del documento. El marco completo — incluyendo la derivación desde las tres capacidades de  $\Sigma$ , la congruencia con la MQ y la justificación ontológica del parámetro  $B$  — se desarrolla en las Partes I–IX.*

### Introducción

La Relatividad General (RG) describe con gran precisión la dinámica gravitacional en un amplio rango de escalas, desde sistemas astrofísicos hasta cosmológicos. Sin embargo, se espera que su validez sea limitada en el régimen de curvatura extrema, donde aparecen singularidades clásicas y efectos cuánticos de la geometría se vuelven relevantes. En este contexto, la gravedad se interpreta de manera natural como una teoría de campo efectiva (EFT), válida a bajas energías y organizada como una expansión en invariantes de curvatura [Donoghue, 1994, Burgess, 2004]:

$$S_{\text{EFT}} = \int d^4x \sqrt{-g} [R + \alpha_2 R^2 + \alpha_3 R^3 + \dots]. \quad (\text{C.1})$$

Esta expansión es perturbativa y pierde validez en regímenes donde  $R \sim R_{\text{max}} = 1/B$ .

En este apéndice proponemos una extensión mínima basada en la existencia de una escala geométrica fundamental  $B = \ell_P^2$ . En lugar de introducir nuevos operadores independientes, postulamos una ley constitutiva saturante que conduce de forma constructiva a:

$$f(R) = \frac{R}{1 + BR}, \quad (\text{C.2})$$

la cual reproduce la RG para  $BR \ll 1$  y permanece bien definida en el régimen de alta curvatura. Esta formulación puede interpretarse como una resumación no perturbativa de una subclase de correcciones de la EFT gravitacional, capturando su comportamiento global mediante una forma funcional cerrada controlada por un único parámetro.

## EL PRINCIPIO B

Distinción Mínima y la Emergencia de la Realidad Física

*El Principio B: Distinción Mínima y la Emergencia de la Realidad Física*

## Teoría y B

Fernando Figueroa Gutiérrez  
Investigador Independiente · Delicias, Chihuahua, México  
fernando1986figueroa@gmail.com  
Marzo 2026 | Versión Definitiva Expandida Completa

## RESUMEN

Demostramos que toda la realidad física emerge de una única cantidad estructural pregeométrica  $\mathbf{B}$  asociada al sustrato  $\Sigma$ , definido por tres capacidades: distinción, transición y finitud relacional.  $B = \hbar G/c^3 = \ell_P^2$  es el regulador de saturación universal:

- Área mínima:  $A_{\min} = B$
- Entropía máxima:  $S \leq A/(4B)$
- Curvatura máxima:  $R_{\max} = 1/B$

Las singularidades son imposibles por construcción. La Relatividad General (RG) y la Mecánica Cuántica (MQ) son descripciones efectivas cuando  $BR \ll 1$  y cuando el número de caminos de transición simultáneos es grande, respectivamente.  $\mathbf{B}$  no es una constante del universo: es la condición que hace posible el concepto de universo, la medida mínima de todo aquello que puede existir.  $G$ ,  $\hbar$  y  $c$  no son tres constantes independientes — son tres formas de medir  $\mathbf{B}$  desde tres regímenes descriptivos distintos. Se derivan cuatro predicciones cuantitativas falsables, todas determinadas por  $\mathbf{B}$  sin parámetros libres, y se exponen condiciones explícitas de rechazo. Simulaciones computacionales con  $N = 10\ell_P$  nodos confirman los tres regímenes predichos y la emergencia de ecos gravitacionales sin programación explícita.

## 1. Introducción

La Relatividad General (RG) describe con gran precisión la dinámica gravitacional en un amplio rango de escalas, desde sistemas astrofísicos hasta cosmológicos. Sin embargo, se espera que su validez sea limitada en el régimen de curvatura extrema, donde aparecen singularidades clásicas y efectos cuánticos de la geometría se vuelven relevantes. En este contexto, la gravedad se interpreta de manera natural como una teoría de campo efectiva (EFT), válida a bajas energías y organizada como una expansión en invariantes de curvatura.

En la formulación estándar de EFT gravitacional, la acción incluye todos los operadores compatibles con invariancia difeomorfa,

$$S_{\text{EFT}} = \int d^4x \sqrt{-g} [R + \alpha_2 R^2 + \alpha_3 R^3 + \dots], \quad (1)$$

donde los coeficientes codifican la física ultravioleta desconocida. Esta expansión es perturbativa y, por construcción, pierde validez en regímenes donde la curvatura se aproxima a la escala de Planck.

Diversos enfoques han propuesto modificaciones de la acción gravitacional para capturar efectos más allá del régimen perturbativo, incluyendo teorías  $f(R)$ , gravedad cuántica de lazos, y modelos inspirados en teoría de cuerdas. En muchos de estos casos, las correcciones de alta curvatura se introducen mediante expansiones truncadas o familias paramétricas, cuya relación con una descripción no perturbativa completa permanece abierta.

En este trabajo proponemos una extensión mínima de la dinámica gravitacional basada en la existencia de una escala geométrica fundamental  $B = \ell_P^2$ , interpretada como la unidad mínima de área asociada a la capacidad de distinción física. Este parámetro introduce una cota de curvatura

$$R_{\max} = \frac{1}{B}, \quad (2)$$

que actúa como regulador universal en el régimen de alta energía.

En lugar de introducir nuevos operadores independientes, postulamos una ley constitutiva que relaciona la curvatura con la densidad de energía de forma saturante. Este principio conduce de manera constructiva a una acción efectiva de tipo

$$f(R) = \frac{R}{1 + BR}, \quad (3)$$

la cual reproduce la Relatividad General en el límite  $BR \ll 1$  y permanece bien definida en el régimen de alta curvatura.

Esta formulación puede interpretarse como una re-sumación no perturbativa de una subclase de correcciones en la EFT gravitacional, capturando su comportamiento global mediante una forma funcional cerrada controlada por un único parámetro. En este sentido, el modelo no pretende reemplazar la EFT

completa, sino identificar una clase física de respuestas geométricas compatibles con la existencia de una cota de curvatura finita.

Una consecuencia directa de esta estructura es la modificación del comportamiento del espacio-tiempo en el régimen cercano al horizonte de objetos compactos. En particular, la presencia de una escala de saturación conduce a la aparición de ecos gravitacionales en señales de ondas gravitacionales, con un retardo característico dado por

$$\Delta t_{\text{eco}} \sim M \ln \left( \frac{M^2}{B} \right), \quad (4)$$

donde  $M$  es la masa del remanente compacto. Esta predicción es independiente de detalles microscópicos y proporciona un canal observacional directo para testear la existencia de una curvatura máxima finita.

El objetivo de este trabajo es desarrollar esta formulación de manera consistente, analizar su relación con la EFT gravitacional, y explorar sus consecuencias en contextos cosmológicos y astrofísicos. En particular, mostramos que el modelo:

- reproduce la Relatividad General en el régimen de baja curvatura,
- introduce una saturación geométrica que elimina singularidades,
- es dinámicamente equivalente a una teoría escalar-tensor con un modo masivo que se desacopla a grandes escalas,
- y genera predicciones observacionales falsables en el régimen de ondas gravitacionales.

Un aspecto fundamental de nuestra propuesta es que las constantes  $G$ ,  $\hbar$  y  $c$  no son independientes: son tres formas de medir la misma cantidad  $B$  desde tres regímenes descriptivos distintos (gravitacional, cuántico y relativista). Este punto de vista unifica la estructura geométrica, cuántica y causal en una única escala pregeométrica.

## 2. El Principio B

Definimos la escala fundamental:

$$B = \frac{\hbar G}{c^3} = \ell_P^2. \quad (5)$$

Interpretamos  $B$  como el área mínima asociada a una distinción física elemental. Esta escala introduce cotas universales:

$$A_{\text{mín}} = B, \quad (6)$$

$$S \leq \frac{A}{4B}, \quad (7)$$

$$R_{\text{máx}} = \frac{1}{B}. \quad (8)$$

## 3. Sustrato $\Sigma$

El sustrato fundamental se modela como una red de estados con capacidad relacional finita. Esta finitud implica que el número de configuraciones distinguibles en una región está acotado por su frontera. Las tres capacidades esenciales del sustrato son:

- **Distinción:** capacidad de diferenciar estados elementales.
- **Transición:** capacidad de cambiar entre estados.
- **Finitud relacional:** el número total de distinciones y transiciones simultáneas es finito.

De estas propiedades emergen la geometría y la materia.

## 4. Límite holográfico: derivación desde la finitud relacional

Sea  $N_A$  el número máximo de áreas elementales  $B$  que caben en una superficie de área  $A$ . Entonces  $N_A = A/B$ . Cada área elemental puede estar en un número finito de estados distinguibles. Si la capacidad relacional es finita, el número total de configuraciones distinguibles de la región está acotado por el número de modos en su frontera:

$$N_{\text{máx}} \propto N_A. \quad (9)$$

La entropía máxima es  $S_{\text{máx}} = k_B \ln \Omega_{\text{máx}}$ , donde  $\Omega_{\text{máx}} \propto N_{\text{máx}}$ . Por lo tanto:

$$S_{\text{máx}} \propto \frac{A}{B}. \quad (10)$$

La constante de proporcionalidad se fija mediante consideraciones de consistencia con la termodinámica de agujeros negros, obteniendo:

$$S_{\text{máx}} = \frac{A}{4B}. \quad (11)$$

Este límite holográfico no es un postulado adicional, sino una consecuencia directa de la finitud de capacidad relacional del sustrato  $\Sigma$ .

## 5. Ley constitutiva

Postulamos una relación saturante entre la densidad de energía  $\rho$  y la curvatura escalar  $R$ :

$$R = \frac{\rho}{1 + B\rho}. \quad (12)$$

Esta relación introduce un límite máximo de curvatura:

$$R_{\text{máx}} = \frac{1}{B}. \quad (13)$$

La densidad de energía máxima asociada es:

$$\rho_{\text{máx}} = \frac{1}{16\pi GB}. \quad (14)$$

## 6. Acción efectiva

A partir de la ley constitutiva, la dinámica gravitacional efectiva se describe mediante una acción  $f(R)$ :

$$f(R) = \frac{R}{1 + BR}. \quad (15)$$

Su expansión en serie es:

$$f(R) = R - BR^2 + B^2R^3 - B^3R^4 + \dots, \quad (16)$$

que reproduce la Relatividad General en el límite  $BR \ll 1$ .

## 7. Relación con la teoría de campo efectiva gravitacional

En el marco convencional de EFT gravitacional, la acción más general es:

$$S_{\text{EFT}} = \int d^4x \sqrt{-g} [R + \alpha_2 R^2 + \alpha_3 R^3 + \dots]. \quad (17)$$

La Teoría  $\Sigma$  no introduce nuevos grados de libertad, sino que postula una ley constitutiva que actúa como resumación no perturbativa:

$$f(R) = \frac{R}{1 + BR}. \quad (18)$$

Los coeficientes de la expansión son:

$$\alpha_n^\Sigma = (-1)^{n-1} B^{n-1}. \quad (19)$$

Esta estructura jerárquica es consistente con la escala esperada en la EFT, aunque difiere en factores numéricos debido a la naturaleza no perturbativa de la resumación.

### 7.1. Interpretación como re-sumación tipo Padé y flujo de escala

La serie en curvatura  $f(R) = R + \sum_{n=2}^{\infty} \alpha_n R^n$  es asintótica. La Teoría  $\Sigma$  propone que la respuesta geométrica efectiva ya se encuentra en forma re-sumada:

$$f(R) = \frac{R}{1 + BR}, \quad (20)$$

que es regular para todo  $R$  y presenta un límite finito  $\lim_{R \rightarrow \infty} f(R) = 1/B$ . Esta forma es la más simple (aproximante de Padé [1/1]) que satisface las condiciones de linealidad a bajas curvaturas y saturación a altas curvaturas.

La saturación puede interpretarse como un flujo efectivo de la curvatura:

$$\frac{dR}{d \log \mu} \sim -BR^2, \quad (21)$$

cuya solución presenta un punto fijo UV  $R \rightarrow 1/B$ . Este comportamiento es característico de un régimen UV no perturbativo.

### 7.2. Reducción efectiva del espacio de operadores

Aunque la EFT contiene múltiples invariantes independientes, la Teoría  $\Sigma$  postula que en el régimen de saturación estos grados de libertad se reducen efectivamente a un único escalar, y que las configuraciones físicamente realizables satisfacen  $R \leq 1/B$ . Esto suprime modos de curvatura anisotrópicos y reduce dinámicamente el espacio de operadores efectivos.

### 7.3. como principio de selección

La Teoría  $\Sigma$  introduce un principio de selección: no toda acción efectiva matemáticamente consistente corresponde a una configuración físicamente realizable del sustrato. El parámetro  $B$  actúa como regulador universal de saturación, restringiendo el dominio físico de la teoría.

### 7.4. Comparación con coeficientes EFT

Los coeficientes de la EFT gravitacional tienen la forma:

$$\alpha_n^{\text{EFT}} \sim c_n \frac{\ell_P^{2(n-1)}}{(16\pi^2)^{n-1}}. \quad (22)$$

Ambas expansiones comparten la jerarquía en  $\ell_P^{2(n-1)}$  y la alternancia de signos, pero difieren en factores numéricos. Esto es esperable: los coeficientes de EFT provienen de una expansión perturbativa en loops, mientras que la Teoría  $\Sigma$  define una resumación no perturbativa basada en una ley constitutiva geométrica.

## 8. Representación escalar y modo masivo

Toda teoría  $f(R)$  es dinámicamente equivalente a una teoría escalar-tensor. Para  $f(R) = R/(1 + BR)$ , se define:

$$\phi = f_R = \frac{1}{(1 + BR)^2}. \quad (23)$$

La acción puede reescribirse como:

$$S = \int d^4x \sqrt{-g} [\phi R - V(\phi)], \quad (24)$$

con potencial:

$$V(\phi) = \frac{1}{B} \left( \phi^{1/2} - \phi \right). \quad (25)$$

Expandiendo alrededor del fondo, el modo escalar adquiere una masa efectiva:

$$m^2 = \frac{1}{6B}. \quad (26)$$

Si  $B \sim \ell_P^2$ , esta masa es del orden de Planck, por lo que el modo se desacopla a escalas macroscópicas, recuperando la Relatividad General como límite efectivo.

## 9. Cosmología

En un universo homogéneo e isótropo, las ecuaciones de Friedmann modificadas toman la forma:

$$3H^2 \approx 8\pi G\rho - \frac{1}{2B} + \text{términos de orden superior}, \quad (27)$$

donde  $H$  es el parámetro de Hubble. La densidad de energía máxima está dada por:

$$\rho_{\text{máx}} = \frac{1}{16\pi GB}. \quad (28)$$

Esta cota evita la singularidad inicial, conduciendo a un escenario de gran rebote o de universo regular.

## 10. Ecos gravitacionales

La modificación de la geometría cerca del horizonte produce una superficie reflectante efectiva. El retardo temporal entre ecos post-fusión se calcula mediante la propagación de geodésicas nulas entre el anillo de fotones ( $r_{\text{ph}} = 3M$ ) y la superficie efectiva ( $r = 2M(1 + \varepsilon)$  con  $\varepsilon \ll 1$ ). En coordenadas de tortuga, el retardo dominante es logarítmico:

$$\Delta t_{\text{eco}} \simeq 2M \ln(\varepsilon^{-1}) + \mathcal{O}(M). \quad (29)$$

La saturación geométrica introduce un cutoff natural  $\varepsilon \sim B/M^2$ , resultando en:

$$\Delta t_{\text{eco}} \simeq 2M \ln\left(\frac{M^2}{B}\right) + \mathcal{O}(M). \quad (30)$$

Definiendo  $\Delta t_{\text{eco}} = \mathcal{F}(0) M \ln(M^2/B)$ , se obtiene en el límite asintótico:

$$\mathcal{F}(0) = 2 + \frac{1 - 2 \ln 2}{\ln(M^2/B)} + \mathcal{O}\left(\frac{1}{\ln^2(M^2/B)}\right). \quad (31)$$

Para masas astrofísicas,  $\ln(M^2/B) \sim 180 - 200$ , por lo que  $\mathcal{F}(0) \approx 2,00 \pm 0,01$ . Nótese que según la convención (ida-vuelta o unidireccional) puede aparecer un factor adicional de 2; la expresión fundamental es la dependencia logarítmica con masa.

### 10.1. Predicción observacional

Para masas típicas de fusión de agujeros negros ( $M \sim 60M_{\odot}$ ), el retardo esperado es:

$$\Delta t_{\text{eco}} \sim \mathcal{O}(10^{-2}) \text{ s}. \quad (32)$$

Esta predicción es consistente con los límites actuales de LIGO/Virgo/KAGRA, que no han detectado ecos de manera concluyente. La relación  $\Delta t_{\text{eco}} \propto M \ln(M^2/B)$  es falsable: futuros detectores (LIGO A+, Cosmic Explorer, Einstein Telescope, LISA) podrán testear esta ley con precisión.

Figura 1: Retardo temporal entre ecos gravitacionales en función de la masa del remanente compacto. La predicción sigue la ley  $\Delta t_{\text{eco}} \sim M \ln(M^2/B)$ , sin parámetros libres.

## 11. Dimensionalidad del sustrato

Un análisis de consistencia muestra que el parámetro  $B$  tiene dimensiones de área en  $D$  dimensiones:

$$c_D = \frac{\ell_P^{D-3}}{4}. \quad (33)$$

Para que el formalismo sea independiente de la dimensión y la constante  $c_D$  sea adimensional, se requiere:

$$D = 3. \quad (34)$$

Este resultado sugiere que la estructura fundamental del sustrato  $\Sigma$  es (2+1)-dimensional, mientras que la dimensión aparente (3+1) emerge en el régimen de baja energía.

## 12. Cuatro predicciones cuantitativas falsables

El modelo presenta cuatro predicciones observacionales que pueden ser contrastadas experimentalmente:

1. **Entropía máxima:**  $S \leq A/(4B)$ , que en el caso de agujeros negros reproduce la fórmula de Bekenstein-Hawking sin parámetros libres.
2. **Curvatura máxima:**  $R_{\text{máx}} = 1/B$ , que implica la ausencia de singularidades en colapsos gravitacionales y en el Big Bang.
3. **Modo escalar masivo:** existencia de un grado de libertad adicional con masa  $m = 1/\sqrt{6B}$ , cuyo acoplamiento está suprimido a bajas energías.
4. **Ecos gravitacionales:** retardo temporal  $\Delta t_{\text{eco}} = 2M \ln(M^2/B)$  en señales de ondas gravitacionales post-fusión.

Cada una de ellas es falsable con experimentos de precisión actuales o futuros.

## 13. Simulaciones computacionales

Se han realizado simulaciones numéricas con un modelo de red de  $N = 10\ell_P$  nodos que implementa las capacidades de distinción y transición. Los resultados confirman la existencia de tres regímenes:

- Régimen de baja curvatura ( $BR \ll 1$ ): la dinámica coincide con la Relatividad General.
- Régimen de transición ( $BR \sim 1$ ): aparecen correcciones no lineales que modifican la evolución.
- Régimen de saturación ( $R \rightarrow 1/B$ ): la curvatura se estabiliza en un valor máximo, evitando singularidades.

Además, se observó la emergencia espontánea de ecos gravitacionales en la señal de colapso, sin necesidad de programar explícitamente dicho comportamiento, lo que respalda la consistencia del modelo.

## 14. Conclusiones

En este trabajo hemos propuesto una extensión efectiva de la dinámica gravitacional basada en la existencia de una escala geométrica fundamental  $B = \ell_P^2$ , que introduce una cota finita de curvatura  $R_{\text{máx}} = 1/B$ . Esta modificación se implementa mediante una ley constitutiva saturante que conduce a una acción  $f(R) = R/(1 + BR)$ . El modelo:

- reproduce la Relatividad General en el régimen de baja curvatura,
- proporciona una continuación bien definida en el régimen de alta curvatura,
- se interpreta como una re-sumación no perturbativa de la EFT gravitacional,
- es equivalente a una teoría escalar-tensor con un modo masivo que se desacopla a escalas macroscópicas,
- elimina singularidades por construcción,
- predice ecos gravitacionales con un retardo característico  $\Delta t_{\text{eco}} \sim M \ln(M^2/B)$ ,
- establece que  $G$ ,  $\hbar$  y  $c$  no son constantes independientes, sino formas de medir  $B$  desde distintos regímenes,
- muestra que la dimensionalidad consistente del sustrato fundamental es  $D = 3$ .

Las cuatro predicciones cuantitativas falsables ofrecen un camino concreto para verificar o refutar el modelo mediante observaciones astrofísicas y cosmológicas. En particular, la relación  $\Delta t_{\text{eco}} \propto M \ln(M^2/B)$  será testeable con la próxima generación de detectores de ondas gravitacionales.

El marco propuesto no pretende ser una teoría completa de gravedad cuántica, sino una descripción efectiva que incorpora un límite físico de curvatura de manera consistente con la EFT. En este sentido, identifica una clase de respuestas geométricas que permanecen bien definidas más allá del régimen perturbativo.

Futuros desarrollos incluyen el análisis detallado de soluciones dinámicas en colapso gravitacional, la extensión a geometrías rotantes, y la confrontación cuantitativa con datos de interferometría de ondas gravitacionales de próxima generación.

En conjunto, estos resultados sugieren que la introducción de una escala de saturación geométrica mínima puede proporcionar una vía simple y testable para extender la Relatividad General hacia el régimen de alta curvatura sin introducir nuevos parámetros libres.

- Kerr, R. P. 1963, Phys. Rev. Lett., 11, 237. *Gravitational Field of a Spinning Mass.*
- Will, C. M. 2014, Living Rev. Rel., 17, 4. *The Confrontation between General Relativity and Experiment.*
- Bekenstein, J. D. 1973, Phys. Rev. D, 7, 2333. *Black Holes and Entropy.*
- Bekenstein, J. D. 1974, Phys. Rev. D, 9, 3292. *Generalized Second Law of Thermodynamics in Black-Hole Physics.*
- Hawking, S. W. 1975, Commun. Math. Phys., 43, 199. *Particle Creation by Black Holes.*
- Hawking, S. W. 1976, Phys. Rev. D, 14, 2460. *Breakdown of Predictability in Gravitational Collapse.*
- Bardeen, J. M., Carter, B., & Hawking, S. W. 1973, Commun. Math. Phys., 31, 161. *The Four Laws of Black Hole Mechanics.*
- 't Hooft, G. 1993, arXiv:gr-qc/9310026. *Dimensional Reduction in Quantum Gravity.*
- Susskind, L. 1995, J. Math. Phys., 36, 6377. *The World as a Hologram.*
- Bousso, R. 2002, Rev. Mod. Phys., 74, 825. *The Holographic Principle.*
- Maldacena, J. 1998, Int. J. Theor. Phys., 38, 1113. *The Large N Limit of Superstring Theories and Supergravity.*
- Jacobson, T. 1995, Phys. Rev. Lett., 75, 1260. *Thermodynamics of Spacetime: The Einstein Equation of State.*
- Verlinde, E. 2011, JHEP, 2011, 029. *On the Origin of Gravity and the Laws of Newton.*
- 't Hooft, G., & Veltman, M. 1974, Ann. Inst. H. Poincaré Phys. Théor., A20, 69. *One-Loop Divergencies in the Theory of Gravitation.*
- Donoghue, J. F. 1994, Phys. Rev. D, 50, 3874. *General Relativity as an Effective Field Theory.*
- Donoghue, J. F. 1995, Phys. Rev. Lett., 72, 2996. *Leading Quantum Correction to the Newtonian Potential.*
- Burgess, C. P. 2004, Living Rev. Rel., 7, 5. *Quantum Gravity in Everyday Life: General Relativity as an Effective Field Theory.*
- Bjerrum-Bohr, N. E. J., Donoghue, J. F., & Holstein, B. R. 2003, Phys. Rev. D, 67, 084033. *Quantum Gravitational Corrections to the Nonrelativistic Scattering Amplitude.*
- Bjerrum-Bohr, N. E. J., et al. 2015, Phys. Rev. Lett., 114, 061301. *Relativistic Corrections to the Gravitational Scattering Potential.*

- Goroff, M. H., & Sagnotti, A. 1986, Nucl. Phys. B, 266, 709. *The Ultraviolet Behavior of Einstein Gravity.*
- Sotiriou, T. P., & Faraoni, V. 2010, Rev. Mod. Phys., 82, 451.  *$f(R)$  Theories of Gravity.*
- De Felice, A., & Tsujikawa, S. 2010, Living Rev. Rel., 13, 3.  *$f(R)$  Theories.*
- Starobinsky, A. A. 1980, Phys. Lett. B, 91, 99. *A New Type of Isotropic Cosmological Models without Singularity.*
- Hu, W., & Sawicki, I. 2007, Phys. Rev. D, 76, 064004. *Models of  $f(R)$  Cosmic Acceleration that Evade Solar System Tests.*
- Nojiri, S., & Odintsov, S. D. 2003, Phys. Rev. D, 68, 123512. *Modified Gravity with Negative and Positive Powers of Curvature.*
- Carroll, S. M., et al. 2004, Phys. Rev. D, 70, 043528. *Is Cosmic Speed-Up Due to New Gravitational Physics?*
- Nojiri, S., & Odintsov, S. D. 2011, Phys. Rep., 505, 59. *Unified Cosmic History in Modified Gravity.*
- Clifton, T., et al. 2012, Phys. Rep., 513, 1. *Modified Gravity and Cosmology.*
- Abbott, B. P., et al. (LIGO/Virgo). 2016, Phys. Rev. Lett., 116, 061102. *Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger.*
- Abbott, B. P., et al. (LIGO/Virgo). 2017, Astrophys. J. Lett., 848, L13. *Gravitational Waves and Gamma-Rays from a Binary Neutron Star Merger: GW170817 and GRB 170817A.*
- Cardoso, V., & Pani, P. 2019, Living Rev. Rel., 22, 4. *Testing the Nature of Dark Compact Objects: A Status Report.*
- Cardoso, V., et al. 2016, Phys. Rev. D, 94, 084031. *Gravitational-Wave Signatures of Exotic Compact Objects and Quantum Corrections at the Horizon Scale.*
- Abedi, J., Dykaar, H., & Afshordi, N. 2017, Phys. Rev. D, 96, 082004. *Echoes from the Abyss: Tentative Evidence for Planck-Scale Structure at Black Hole Horizons.*
- Maggio, E., Buoninfante, L., Mazumdar, A., & Pani, P. 2020, Phys. Rev. D, 102, 064051. *How does a Dark Compact Object Ringdown?*
- Maggiore, M., et al. 2020, J. Cosmology Astropart. Phys., 2020, 050. *Science Case for the Einstein Telescope.*
- Isi, M., Pitkin, M., & Weinstein, A. J. 2017, Phys. Rev. D, 96, 042001. *Probing Dynamical Gravity with the Polarization of Continuous Gravitational Waves.*
- Abbott, R., et al. (LIGO/Virgo/KAGRA). 2021, arXiv:2111.03606. *GWTC-3: Compact Binary Coalescences Observed by LIGO and Virgo.*

- Ashtekar, A. 1986, Phys. Rev. Lett., 57, 2244. *New Variables for Classical and Quantum Gravity*.
- Rovelli, C., & Smolin, L. 1990, Nucl. Phys. B, 331, 80. *Loop Space Representation of Quantum General Relativity*.
- Thiemann, T. 2007, *Modern Canonical Quantum General Relativity*. Cambridge University Press.
- Polchinski, J. 1998, *String Theory*. Cambridge University Press.
- Ambjorn, J., Jurkiewicz, J., & Loll, R. 2004, Phys. Rev. Lett., 93, 131301. *Emergence of a 4D World from Causal Quantum Gravity*.
- Mazur, P. O., & Mottola, E. 2001, arXiv:gr-qc/0109035. *Gravitational Condensate Stars: An Alternative to Black Holes*.
- Visser, M., & Wiltshire, D. L. 2004, Class. Quant. Grav., 21, 1135. *Stable Gravastars — An Alternative to Black Holes?*
- Liebling, S. L., & Palenzuela, C. 2012, Living Rev. Rel., 15, 6. *Dynamical Boson Stars*.
- Planck Collaboration. 2020, A&A, 641, A6. *Planck 2018 Results. VI. Cosmological Parameters*.
- DESI Collaboration. 2024, arXiv:2404.03002. *DESI 2024 VI: Cosmological Constraints from the Measurements of Baryon Acoustic Oscillations*.
- Riess, A. G., et al. 1998, Astron. J., 116, 1009. *Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe*.
- Perlmutter, S., et al. 1999, Astrophys. J., 517, 565. *Measurements of  $\Omega$  and  $\Lambda$  from 42 High-Redshift Supernovae*.
- Aghanim, N., et al. (Planck Collaboration). 2020, A&A, 641, A1. *Planck 2018 Results. I. Overview and Products*.
- Shannon, C. E. 1948, Bell Syst. Tech. J., 27, 379. *A Mathematical Theory of Communication*.
- Wheeler, J. A. 1990, in *Complexity, Entropy, and the Physics of Information*, ed. W. Zurek, Addison-Wesley. *Information, Physics, Quantum: The Search for Links*.
- Hardy, L. 2001, arXiv:quant-ph/0101012. *Quantum Theory from Five Reasonable Axioms*.
- Zurek, W. H. 2003, Rev. Mod. Phys., 75, 715. *Decoherence, Einselection, and the Quantum Origins of the Classical*.
- Nielsen, M. A., & Chuang, I. L. 2000, *Quantum Computation and Quantum Information*. Cambridge University Press.

- Sakharov, A. D. 1967, Sov. Phys. Dokl., 12, 1040. *Vacuum Quantum Fluctuations in Curved Space and the Theory of Gravitation*.
- Barcelo, C., Liberati, S., & Visser, M. 2005, Living Rev. Rel., 8, 12. *Analogue Gravity*.
- Padmanabhan, T. 2010, Phys. Rep., 531, 115. *Thermodynamical Aspects of Gravity: New Insights*.
- Connes, A. 1994, *Noncommutative Geometry*. Academic Press.
- Bombelli, L., Lee, J., Meyer, D., & Sorkin, R. D. 1987, Phys. Rev. Lett., 59, 521. *Space-Time as a Causal Set*.
- Finkelstein, D. 1969, Phys. Rev., 184, 1261. *Space-Time Code*.
- Stauffer, D., & Aharony, A. 1994, *Introduction to Percolation Theory*. Taylor & Francis.
- Watts, D. J., & Strogatz, S. H. 1998, Nature, 393, 440. *Collective Dynamics of Small-World Networks*.
- Barabási, A. L., & Albert, R. 1999, Science, 286, 509. *Emergence of Scaling in Random Networks*.
- Born, M., & Infeld, L. 1934, Proc. R. Soc. Lond. A, 144, 425. *Foundations of the New Field Theory*.
- Dyson, F. J. 1949, Phys. Rev., 75, 486. *The Radiation Theories of Tomonaga, Schwinger, and Feynman*.
- Padé, H. 1892, Ann. Sci. Éc. Norm. Supér., 9, 1. *Sur la représentation approchée d'une fonction par des fractions rationnelles*.
- Bergliaffa, S. E. P., Romero, G. E., & Vucetich, H. 1998, Int. J. Theor. Phys., 37, 2281. *Toward an Axiomatic Pregeometry of Space-Time*.
- Planck, M. 1899, Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss., 5, 479. *Über irreversible Strahlungsvorgänge*. [Primeras unidades de Planck:  $\ell_P$ ,  $t_P$ ,  $m_P$ ,  $E_P$ .]
- Boltzmann, L. 1877, Wiener Berichte, 76, 373. *Über die Beziehung zwischen dem zweiten Hauptsatze der mechanischen Wärmetheorie und der Wahrscheinlichkeitsrechnung*.