5. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

5.1 Concepto y origen de la genética cuantitativa

La genética cuantitativa es la rama de la genética que estudia los caracteres cuya expresión fenotípica resulta de la acción conjunta de numerosos genes y de la influencia del ambiente. Estos caracteres, denominados cuantitativos o métricos, presentan una distribución continua en las poblaciones y suelen medirse mediante escalas numéricas como peso, altura, rendimiento, contenido de proteína o biomasa (Vallejo & Estrada, 2013).

Los primeros estudios sobre herencia estuvieron centrados en caracteres cualitativos descritos por Mendel, donde era posible distinguir categorías fenotípicas bien definidas. Sin embargo, muchos rasgos de interés agrícola no siguen patrones mendelianos simples, sino que muestran una variación gradual entre individuos. Esta situación llevó al desarrollo de la genética biométrica y posteriormente de la genética cuantitativa, disciplina que integra principios genéticos y estadísticos para explicar la variación observada en las poblaciones (Falconer & Mackay, 1996).

De acuerdo con Vallejo y Estrada (2013), la importancia de la genética cuantitativa radica en que la mayoría de los caracteres de valor económico en los cultivos son de naturaleza poligénica. Por esta razón, los programas modernos de mejoramiento dependen de la estimación de parámetros genéticos que permitan predecir la respuesta a la selección y optimizar la toma de decisiones.

5.2 Caracteres cuantitativos y herencia poligénica

Los caracteres cuantitativos son aquellos cuya expresión depende de múltiples genes conocidos como poligenes. Cada gen contribuye con una pequeña proporción del efecto total observado, por lo que los fenotipos resultantes no pueden clasificarse en categorías discretas. Según Vallejo y Estrada (2013), la herencia poligénica genera una gran diversidad fenotípica dentro de las poblaciones, permitiendo la selección de individuos superiores para características agronómicas complejas. Entre los caracteres cuantitativos más importantes se encuentran:

- Rendimiento de grano.
- Altura de planta.
- Producción de frutos.
- Resistencia parcial a enfermedades.
- Eficiencia en el uso de nutrientes.
- Tolerancia a estrés hídrico o salino.
- Calidad nutricional de los productos agrícolas.

La expresión de estos caracteres es el resultado de la acción simultánea de los genes y del ambiente. Por ello, dos individuos con genotipos similares pueden presentar fenotipos diferentes cuando crecen bajo condiciones ambientales distintas (Acquaah, 2020).

5.3 Variación fenotípica y sus componentes

Uno de los principios fundamentales de la genética cuantitativa establece que el fenotipo observado es consecuencia de factores genéticos y ambientales. Vallejo y Estrada (2013) expresan esta relación mediante:

$$P=G+EP = G + E$$

donde:

P = valor fenotípico.

G = valor genético.

E = efecto ambiental.

En poblaciones evaluadas bajo múltiples condiciones ambientales, la ecuación puede ampliarse para incluir la interacción genotipo × ambiente:

$$P=G+E+GxE = G + E + GE$$

Esta relación evidencia que el desempeño de un genotipo no depende exclusivamente de su constitución genética, sino también del ambiente en el que se desarrolla. A nivel poblacional, la variación observada puede descomponerse en:

$$V_P=V_G+V_E+V_{GE} = V_G + V_E + V_\{GE\}$$

donde:

- V_P = varianza fenotípica.
- V_G = varianza genética.
- V_E= varianza ambiental.
- V_{GE}=V_{GE} = varianza por interacción genotipo × ambiente.

Según Vallejo y Estrada (2013), esta partición constituye la base para la estimación de parámetros genéticos utilizados en el mejoramiento vegetal.

5.4 Componentes de la varianza genética

La varianza genética puede dividirse en varios componentes que reflejan distintos tipos de acción génica.

$$V_G=V_A+V_D+V_IV_G = V_A + V_D + V_I$$

Varianza aditiva (VA)

Representa los efectos acumulativos de los alelos que son transmitidos de padres a descendientes. Es el componente más importante en el mejoramiento vegetal porque determina directamente la respuesta a la selección (Vallejo & Estrada, 2013). Cuando un programa de selección busca aumentar el rendimiento de una población, el objetivo principal es incrementar la frecuencia de alelos favorables que contribuyen a la varianza aditiva.

Varianza de dominancia (VD)

Se origina por la interacción entre alelos de un mismo locus. Este componente es responsable de fenómenos como la heterosis o vigor híbrido, ampliamente aprovechado en cultivos como maíz, sorgo y girasol (Acquaah, 2020).

Varianza epistática (VI)

Corresponde a las interacciones entre genes localizados en diferentes loci. Aunque puede influir considerablemente en algunos caracteres, su aprovechamiento mediante selección suele ser más complejo debido a su comportamiento menos predecible (Falconer & Mackay, 1996).

5.5 Heredabilidad

La heredabilidad es uno de los parámetros más relevantes en genética cuantitativa porque indica la proporción de la variación fenotípica atribuible a diferencias genéticas entre individuos. Vallejo y Estrada (2013) distinguen dos tipos:

Heredabilidad en sentido amplio

$H^2=V_G /V_P$
Incluye todos los componentes de la varianza genética.

Heredabilidad en sentido estricto

$h2=V_A/Vp$

Considera únicamente la varianza aditiva y tiene especial importancia para los programas de selección.

De acuerdo con Falconer y Mackay (1996), la heredabilidad no es una propiedad fija de un carácter, sino una estimación dependiente de la población y del ambiente donde se realiza la evaluación. En términos prácticos:

Valor de h^2	Interpretación
< 0,30	Baja
0,30 - 0,60	Moderada
> 0,60	Alta

Cuando la heredabilidad es alta, la selección fenotípica suele producir avances genéticos rápidos y consistentes.

5.6 Ganancia genética y respuesta a la selección

Un objetivo central del mejoramiento vegetal consiste en estimar el progreso esperado después de seleccionar individuos superiores. La respuesta a la selección se expresa mediante:

$$R=h^2SR = h^2S$$

donde:

- R = respuesta a la selección.
- h2 = heredabilidad en sentido estricto.
- S = diferencial de selección.

Según Vallejo y Estrada (2013), la magnitud de la ganancia genética depende de tres aspectos fundamentales:

1. Variabilidad genética disponible.
2. Intensidad de selección aplicada.
3. Heredabilidad del carácter.

Por tanto, las mayores ganancias se obtienen cuando existe abundante variabilidad genética y una elevada proporción de dicha variación es de naturaleza aditiva.

5.7 Interacción genotipo × ambiente

La interacción genotipo × ambiente (G×E) ocurre cuando los genotipos presentan respuestas diferentes al variar las condiciones ambientales. Vallejo y Estrada (2013) destacan que este fenómeno constituye uno de los principales desafíos del fitomejoramiento porque puede modificar el rendimiento relativo de los materiales genéticos entre localidades. Por ejemplo, una variedad de maíz seleccionada en Palmira podría no expresar el mismo potencial productivo en Buenaventura debido a diferencias en precipitación, humedad relativa, fertilidad del suelo y presión biótica.

La existencia de interacción G×E justifica la realización de ensayos multilocales y multianuales para identificar genotipos con adaptación específica o amplia adaptación.

5.8 Importancia de la genética cuantitativa en el fitomejoramiento moderno

La genética cuantitativa proporciona las herramientas conceptuales y metodológicas para:

- Estimar parámetros genéticos.
- Evaluar variabilidad genética.
- Diseñar programas de selección recurrente.
- Desarrollar híbridos comerciales.
- Implementar selección asistida por marcadores.
- Aplicar selección genómica.
- Predecir ganancias genéticas futuras.

Como señalan Vallejo y Estrada (2013), la comprensión de los principios de la genética cuantitativa permite maximizar la eficiencia de los programas de mejoramiento vegetal y acelerar el desarrollo de cultivares más productivos, resistentes y adaptados a diferentes ambientes.

Referencias

Acquaah, G. (2020). Principles of plant genetics and breeding (3rd ed.). Wiley-Blackwell.

Falconer, D. S., & Mackay, T. F. C. (1996). Introduction to quantitative genetics (4th ed.). Longman.

Vallejo Cabrera, F. A., & Estrada Salazar, E. I. (2013). Mejoramiento genético de plantas (2.ª ed.). Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira.

Allard, R. W. (1999). Principles of plant breeding (2nd ed.). John Wiley & Sons.

Fehr, W. R. (1987). Principles of cultivar development: Theory and technique (Vol. 1). Macmillan Publishing Company.