



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

**Predicción de la duración en términos de
tiempo térmico de las fases fenológicas en
tres variedades de clavel estándar (*Dianthus
caryophyllus*)**

Lorena Carolina Buitrago Rueda

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias Agrarias

Bogotá, Colombia

2024

Predicción de la duración en términos de tiempo térmico de las fases fenológicas en tres variedades de clavel estándar (*Dianthus caryophyllus*)

Lorena Carolina Buitrago Rueda

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:
Magíster en Ciencias Agrarias

Director (a):

Doctor Alfonso Parra Coronado

Codirector (a):

Ph.D. Gerhard Fischer

Línea de Investigación:

Fisiología de la producción

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias Agrarias

Bogotá, Colombia

2024

A Felipe, por sus palabras, compañía y confianza, por su amor y el tiempo necesario para realizarme profesionalmente

A mis padres Isabel y Ernesto por haberme formado como una persona persistente; muchos de mis logros se los debo a ustedes incluyendo a este; siempre me motivaron constantemente para alcanzar mis anhelos.

A mi hermana Laura, por su ejemplo, quien me enseñó que con el trabajo y la perseverancia se encuentra el éxito profesional.

A mis amigos, familiares y compañeros y todas aquellas personas que de una u otra manera han contribuido para el logro de mis objetivos.

Declaración de obra original

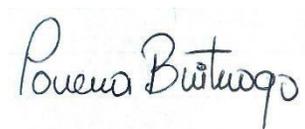
Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.



Lorena Carolina Buitrago Rueda

Fecha 01/07/2024

Resumen

El clavel es una de las flores corte más utilizadas en el mundo y a pesar de su relevancia para la agroindustria en el mundo, muchos aspectos básicos de su biología aún están por estudiar, ya que no existe una descripción del proceso de crecimiento del clavel. El objetivo de este estudio fue realizar una descripción fenológica del desarrollo y posteriormente proponer un modelo fenológico para clavel (*Dianthus caryophyllus* L.), estimando la temperatura base, en las etapas fenológicas vegetativa y reproductiva; donde se determinaron la duración de estos en función de los grados día, con el fin de predecir la fecha de siembra y pico de corte. El estudio fue realizado en una finca de producción de clavel ubicada en el municipio de Tocancipá – Cundinamarca (Colombia), monitoreando los tallos de tres variedades diferentes, en cuatro siembras diferentes durante los años 2018 y 2019, registrando las fechas de aparición de los diferentes estados fenológicos hasta el corte y generando una escala BBCH. La temperatura base para cada etapa fenológica y cada variedad corresponde a la temperatura en la cual se alcanza el valor mínimo del coeficiente de variación mediante el uso de un modelo de regresión cuadrático, o donde la primera derivada del modelo de regresión es igual a cero. La duración de las tres etapas fenológicas en términos de grados días se determinaron utilizando los valores de las temperaturas medias diarias y de las temperaturas base estimada. Los resultados demostraron que las tres variedades evaluadas presentan diferente ciclo de vida desde la siembra hasta la cosecha, además que la temperatura base y los grados día acumulados varían dependiendo del estado de desarrollo del cultivo y la variedad evaluada. En términos generales al estudiar las tres variedades se determinó que se requiere una media de 2580,7 grados día acumulados y 185 días desde la siembra hasta la cosecha de la flor.

Palabras clave: Escala BBCH, grados día de crecimiento, desarrollo, temperatura base, modelo fenológico.

Prediction of the duration of phenological stages in three varieties of standard carnation (*Dianthus caryophyllus* L.) in terms of thermal time

Abstract

The carnation is one of the most used cut flowers in the world, and despite its relevance for agribusiness in the world, many basic aspects of its biology have yet to be studied, since there is no description of the carnation's growth process. The research objective was to make a phenological description of development and subsequently propose a phenological model for carnation (*Dianthus caryophyllus* L.), estimating the base temperature, in the vegetative and reproductive phenological stages and determining the duration of these in terms of degree-days, in order to predict the date of and peak of cutting. The study was carried out in a carnation production farm, nearby the municipality of Tocancipá - Cundinamarca (Colombia), monitoring the stems of three different varieties, in 4 different plantings during the years 2018 and 2019, where the dates of appearance of the phenological stages were recorded until the cut and producing a BBCH scale. The base temperature for each phenological stage and each variety corresponds to the temperature at which the minimum value of the coefficient of variation is reached by using a quadratic regression model, or where the first derivative of the regression model is equal to zero. The length of the three phenological stages in terms of degree-days were determined using the values of the mean daily temperatures and the estimated base temperatures. The results showed that the three evaluated varieties present different life cycles from planting to harvest, in addition that the base temperature and the accumulated degree-days differ depending on the state of development of the crop and the evaluated variety. In general terms, when studying the three varieties, it was determined that an average of 2580,7 accumulated degree days and 185 days are required from planting to harvesting the flower.

Keywords: BBCH scale, degree days of growth, development, base temperature, phenological model.

Contenido

	Pág.
Resumen	IX
Lista de figuras	XIII
Lista de tablas	XIV
Introducción	1
Introducción	1
1. Objetivos	5
1.1 Objetivos generales.....	5
• Generación de una escala fenológica para clavel estándar	5
• Determinación de los tiempos térmicos (grados-día) de dos fases fenológicas en tres cultivares de clavel estándar	5
1.2 Objetivos específicos	5
• Codificación de una escala BBCH para el cultivo de clavel estándar	5
• Determinación de la duración en días de las etapas fenológicas para tres variedades de clavel estándar	5
• Descripción del desarrollo fenológico de tres variedades de clavel estándar	5
• Estimación de la temperatura base para cada etapa fenológica en tres variedades de clavel estándar.....	5
• Estimación del tiempo térmico para cada etapa fenológica en tres variedades de clavel estándar.....	5
2. Marco conceptual	7
2.1 Características del cultivo de clavel (<i>Dianthus caryophyllus</i> L.)	7
2.1.1 Origen y botánica	7
2.1.2 Ciclo productivo y productividad	7
2.1.3 Labores culturales	8
2.2 Ecofisiología del clavel.....	10
2.2.1 Temperatura.....	10
2.2.2 Humedad relativa	10
2.2.3 Requerimientos hídricos	10
2.2.4 Radiación solar.....	11
2.2.5 Suelos	11
2.2.6 Condiciones climáticas y su influencia en el crecimiento y desarrollo	12
2.2.6.1 Temperatura ambiente	12
2.2.6.2 Radiación solar	12

2.2.6.3 Humedad relativa (HR).....	13
2.3 Modelos matemáticos y simulación	14
2.3.1 Clases de modelos.....	15
2.3.2 Modelos aplicados a simulación de cultivos	16
2.3.3 Modelos fenológicos y tiempo térmico.....	18
2.3.4 Métodos de estimación de la temperatura base (Tb).....	20
2.4 Bibliografía	24
3. Temas de Investigación y artículos	29
3.1 Descripción del desarrollo fenológico para el cultivo comercial de clavel (<i>Dianthus caryophyllus</i> L.)	29
3.1.2 Materiales y Métodos	32
3.1.3 Conclusiones y recomendaciones.....	49
3.1.4 Bibliografía.....	50
3.2 Predicción de la duración de las etapas fenológicas en tres variedades de Clavel estándar (<i>Dianthus caryophyllus</i> L.) en términos de tiempo térmico	52
3.2.1 Introducción	53
3.2.2 Materiales y métodos	55
3.2.3 Resultados y discusión	60
3.2.4 Conclusiones	65
3.2.5 Bibliografía.....	66
4. Conclusiones y recomendaciones generales.....	69
4.1 Conclusiones	69
4.2 Recomendaciones.....	70

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Estadio principal de desarrollo 5 (según BBCH), formación del órgano floral (elaboración propia)	42
Figura 2: Estadio principal de desarrollo 6 (según BBCH), Floración hasta el corte (elaboración propia)	44
Figura 3. Semana de aparición de los estadios fenológicos reproductivos para el clavel variedad Diletta	47
Figura 4. Semana de aparición de los estadios fenológicos reproductivos para el clavel variedad Mizuky.	48
Figura 5. Semana de aparición de los estadios fenológicos reproductivos para el clavel variedad Zafiro	49
Figura 6. Temperaturas base (Tb) para las etapas fenológicas de las tres variedades de clavel, estimadas para el mínimo Coeficiente de Variación (CV) de las cantidades de calor calculados (GDD) o donde la pendiente (primera derivada) del modelo de regresión es igual a cero	60
Figura 7. Comparación del valor medio de tiempo térmico acumulado para cada etapa fenológica de tres variedades de clavel	63
Figura 8. Comparación del valor medio del tiempo térmico total acumulado para las tres variedades de clavel	64
Figura 9. Tiempo térmico medio acumulado para cada etapa fenológica en clavel	64

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Estadios de desarrollo del botón principal de clavel estándar que se tuvieron en cuenta para la etapa reproductiva para las tres variedades de clavel	35
Tabla 2. Aperturas comerciales de corte del botón principal de clavel estándar que se tuvieron en cuenta para la etapa reproductiva de corte.	36
Tabla 3. Descripción de las etapas fenológicas de clavel (<i>Dianthus caryophyllus</i> L.), utilizadas comercialmente	37
Tabla 4. Duración de las etapas fenológicas en clavel por variedad desde la siembra hasta el final de cosecha	45
Tabla 5. Fechas de inicio de las diferentes etapas fenológicas para tres variedades de clavel, en cada siembra	59
Tabla 6. Temperatura base para las diferentes etapas fenológicas en tres variedades de clavel	61
Tabla 7. Valores medios de Tiempo Térmico (GDD) para las etapas fenológicas de las tres variedades de clavel (Media \pm DS	63
Tabla 8. Errores RMSE obtenidos en la validación cruzada por variedad	8

Introducción

El clavel (*Dianthus caryophyllus* L.), es una planta herbácea perenne que se encuentra en la familia Caryophyllaceae con hojas opuestas, flores perfectas solitarias que son terminales en el tallo y cada planta produce de siete a diez flores de calidad por ciclo. Actualmente existen tres eco-tipos de clavel, el primero es el mediterráneo que fue producido entre 1955 y 1980, este crece en su mayoría en parte de Italia y algunas zonas de Francia; el segundo es el ecotipo Sim, derivado de la variedad William Sim y, por último, el miniatura o *spray*, desarrollado en Estados Unidos por Thomson en 1956 (Filgueira, 2011). La planta produce una de las flores cortadas más populares, económicas e importantes del mundo debido a la floración perpetua y a la presencia de nuevos cultivares simples y multicolores (Whealy, 1992). En la industria existen diversas variedades de clavel de múltiples colores de interés comercial, su vida en florero, fácil transporte y tanto la producción como la exportación son de importancia para muchos países (Castilla *et al.*, 2014; Hilverda Kooij, 2010).

Taiz y Zeiger (2006) afirmaron que el crecimiento es un aumento constante en el tamaño de un organismo, acompañado de procesos como la morfogénesis y la diferenciación celular. Este proceso incluye varios fenómenos importantes dentro de la planta como lo son la “división celular, elongación, fotosíntesis, síntesis de otros compuestos, respiración, translocación, absorción y transpiración” (Salisbury y Ross, 1994), ligados a factores ambientales como lo es la humedad relativa, la luz y la temperatura. Sin embargo, la temperatura es la de mayor importancia en los procesos de desarrollo de las plantas (Machado *et al.*, 2006; Parra-Coronado *et al.*, 2015).

La fenología es un instrumento ampliamente utilizado para entender mejor los ciclos de crecimiento de las plantas y es descrita por medio de estadios particulares, tales como la formación y desarrollo de hojas, floración, fructificación, dispersión de semillas y germinación; cada uno de estos eventos tiene un momento específico en el año y un

curso de desarrollo característico (Fenner,1998). La aparición, transformación o desaparición rápida de los órganos vegetales se llama fase fenológica y esta se determina por los cambios morfológicos o fisiológicos de la planta. La escala BBCH (Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt and Chemical Industry) surgió como respuesta a la necesidad de crear un vocabulario común que permitiera unificar bajo un solo código las diferentes especies vegetales, con base únicamente en características fenológicas de la planta (Hack *et al.*,1992).

Diversos estudios han confirmado que el crecimiento y el desarrollo de los cultivos, son determinados de manera fundamental por las características climáticas del lugar donde se asientan. Además de la edad de la planta, las relaciones fuente-sumidero y las respuestas al fotoperiodo (Salazar-Gutiérrez *et al.*, 2013). La temperatura es uno de los parámetros ambientales más importantes que condicionan el desarrollo y la supervivencia de las plantas e incide significativamente en la fotosíntesis y la respiración, en la ruptura de la latencia de yemas y semillas (brotación y germinación), en la inducción floral de yemas, la maduración de frutos y la caída de las hojas (Bordón y Blasco, 2018).

Para la predicción de las etapas de crecimiento y desarrollo de los cultivos, se ha utilizado el tiempo calendario, sin embargo, se han propuesto algunos modelos que describen el efecto de la temperatura sobre el desarrollo fenológico, el método más utilizado es la acumulación de temperatura o tiempo térmico (Mendoza López *et al.*, 2004; Salazar-Gutiérrez *et al.*, 2013). El tiempo térmico, está definido como “la cantidad de grados día (GDD) necesarios para finalizar un determinado proceso de desarrollo o etapa fenológica” (Trudgill *et al.*, 2005; López *et al.*, 2010; Parra-Coronado *et al.*, 2015). El término “días de desarrollo” (o crecimiento) se puede definir como el número de días (en grados Celsius) por encima del umbral de temperatura requerido para que una planta complete una etapa, fase o ciclo fenológico. Este método es el mejor para describir el desarrollo porque es independiente del entorno y del año (Arnold, 1959; Salazar-Gutiérrez *et al.*, 2013). Salazar (2006) reitera que el requisito básico para determinar el tiempo de celo en grados día es la temperatura crítica o de referencia (T_b) por debajo de la cual cesa el desarrollo fenológico o cesan los procesos metabólicos en las plantas. Este límite inferior es importante porque determina el efecto de la temperatura en el crecimiento y desarrollo del organismo.

La aplicación del concepto de grados día a las observaciones fenológicas ha sido de gran utilidad en la agricultura y ha sido aplicado en numerosos sistemas de producción de frutas y hortalizas; entre las múltiples aplicaciones de este parámetro se encuentran la programación de fechas de siembra o ciclos de cultivo, pronóstico de fechas de cosecha, pronóstico de rendimiento, determinación del desarrollo vegetal esperado en diferentes localidades, determinación del desarrollo esperado de diferentes genotipos, pronóstico de coeficientes de evapotranspiración de cultivos y pronóstico de aparición de plagas y enfermedades (Clay *et al.*, 2006; Perry *et al.*, 1986).

1. Objetivos

1.1 Objetivos generales

- Generación de una escala fenológica para clavel estándar
- Determinación de los tiempos térmicos (grados-día) de dos fases fenológicas en tres cultivares de clavel estándar

1.2 Objetivos específicos

- Codificación de una escala BBCH para el cultivo de clavel estándar
- Determinación de la duración en días de las etapas fenológicas para tres variedades de clavel estándar
- Descripción del desarrollo fenológico de tres variedades de clavel estándar
- Estimación de la temperatura base para cada etapa fenológica en tres variedades de clavel estándar
- Estimación del tiempo térmico para cada etapa fenológica en tres variedades de clavel estándar

2. Marco conceptual

2.1 Características del cultivo de clavel (*Dianthus caryophyllus* L.)

2.1.1 Origen y botánica

El clavel comercial pertenece al género *Dianthus*, familia Caryophyllaceae, especie *Dianthus caryophyllus* L. y proviene de especies ancestrales de *D. caryophyllus*; es nativo de Europa Meridional y Asia Occidental. Según Teofastro, fue cultivado en Grecia en 300 A.C, por lo que lleva cultivado más de 2000 años (Dona *et al.*, 2017). Existen diferentes tipos de claveles y cada uno de estos se puede cultivar exitosamente en las partes más frías de las llanuras y en elevaciones medias a altas; actualmente existen tres ecotipos de clavel, el primero es el mediterráneo que fue producido entre 1955 y 1980, este crece en su mayoría en parte de Italia y algunas zonas de Francia; el segundo es el ecotipo Sim, derivado de la variedad William Sim y, por último, el miniatura o *spray*, desarrollado en Estados Unidos por Thomson en 1956 (Filgueira, 2011).

Las plantas de clavel son herbáceas, perennes de tallos erectos, con nudos hinchados y entrenudos lampiños, con hojas enteras, sin estipulas, dispuestas de manera opuesta, cubiertas de una cutícula cerosa y presentan flores perfectas solitarias que son terminales en el tallo; las flores son regulares, hermafroditas con corola de varios pétalos anchos y un cáliz cilíndrico; las raíces son adventicias, finas, muy superficiales y sensibles a cualquier esfuerzo mecánico (Dona *et al.*, 2017).

2.1.2 Ciclo productivo y productividad

En términos comerciales se estima un ciclo de vida útil del cultivo del clavel de dos años, y esto debido a las condiciones que presentan en Colombia (Castellanos *et al.*, 2010). El clavel estándar presenta una productividad anual promedio entre 180 y 210 flores/m², dependiendo de las diferentes variedades y los factores climáticos (Pizano de Márquez,

2000). Arévalo et al. (2007) afirmaron que el clavel estándar presenta siete estadios fenológicos; el primero es el crecimiento y la adherencia de la raíz después del trasplante que ocurre entre las semanas 0 a 6; el segundo ocurre después del pinch o despunte y es el desarrollo de brotes laterales, que ocurre entre las semanas 5 a 15; el tercer estadio fenológico corresponde al crecimiento vegetativo con la elongación de los tallos, que ocurre entre la semana 14 a la 24; el cuarto estadio corresponde a la formación del botón principal y laterales entre las semanas 16 a 30; el quinto estadio corresponde al primer pico o primera cosecha de producción, la cual se extiende aproximadamente hasta la semana 34, teniendo en general un span de cosecha de diez semanas; ya cortadas las flores el cultivo entra en un estadio de valle, donde la planta vuelve a entrar a una fase vegetativa, este segundo periodo corresponde al sexto estadio fenológico, donde se desarrollan por debajo de los puntos de corte nuevos brotes laterales aproximadamente hasta la semana 50; esta brotación presenta una menor uniformidad que la presentada en el primer pico de producción, ya que estos brotes son inducidos por la luminosidad, y esta no va a ser directa sobre los nuevos brotes, debido a la interferencia de los tallos que se encuentran en crecimiento o próximos a la cosecha; y por último, se tendrá un segundo pico de cosecha hasta la semana 65 aproximadamente, de ahí en adelante se presentara una producción continua donde se presentara una tercera y hasta una cuarta floración, que se combinaran debido a una producción estable, hasta el momento que se decida renovar el cultivo.

2.1.3 Labores culturales

Baracaldo y Flórez (2010) afirman que el cultivo del clavel es muy exigente en cuanto a las labores culturales que se realizan, ya que estas influyen directamente en la productividad del cultivo y la calidad del tallo; dichas labores se programan para estadios específicos del desarrollo del cultivo, ya que su ejecución las define la propia planta.

La primera labor que se realiza es el despunte o *pinch*, labor que requiere gran cantidad de mano de obra, debido a que en ella se realiza un despunte sencillo, donde se elimina la dominancia apical de la planta, con el fin de controlar el desarrollo de los brotes laterales vegetativos donde se producirán las flores. Con el despunte, también se impide el gasto energético que utiliza la planta para desarrollo reproductivo que es inútil en un

sistema de producción comercial; esta labor es realizada entre los 28 y 50 días después de sembrado el esqueje (Castellanos *et al.*, 2010).

El riego durante el primer estado de desarrollo se realiza de manera manual con mangueras y pomos en forma que refresque simulando una lluvia, se utiliza un sistema de alta frecuencia de riego para ajustarse a las condiciones climáticas necesarias, buscando mantener el sustrato hidratado y las plantas hidratadas; este riego se realiza hasta la quinta semana de vida, acompañando con refuerzos de fertilizantes de manera manual, que junto al sistema de riego por goteo, garantiza el correcto crecimiento y desarrollo de la planta. Una vez pasadas cinco semanas se deja de realizar el refresque y el cultivo es manejado por fertirriego junto a algunos refuerzos manuales que serán realizados durante el desarrollo vegetativo; una vez finalizado este estado se suspenden los refuerzos manuales y comienza el manejo solamente con fertirriego hasta la cosecha (Castellanos *et al.*, 2010).

Durante el desarrollo vegetativo se realizan dos labores que son indispensable para que el tallo de clavel crezca erecto: la primera es el empirole o enmalle, para lo cual en algunas fincas utilizan malla de entutorar y otras empresas realizan un entretejido de hilaza, que se hace en forma manual formando cuadros directamente en la cama de producción, cuyos tamaños dependen del número de plantas sembradas por cama elegida por el productor; esta se realiza de manera ascendente a medida que los tallos van subiendo, dejando 20 cm entre piso y piso. La segunda labor es el encanaste, proceso que consiste en guiar los tallos de la planta desde la base hasta la punta de manera que estos queden metidos en el mismo cuadro de los diferentes niveles empirole, esta labor se realiza manualmente, ya que no existen tecnologías que realicen esta labor (Castellanos *et al.*, 2010).

Una vez comienza el desarrollo de la flor y antes del corte se debe realizar la labor del desbotone, que es una práctica de cultivo indispensable en el cultivo del clavel y consiste en retirar los brotes o botones laterales de cada tallo, desde la parte baja del tallo donde se va a cortar, hasta el nudo más próximo de la flor; con el desbotone busca que se desarrolle con fuerza una sola flor, con un tallo que se mantenga robusto, alcance gran tamaño y termine su crecimiento satisfactoriamente. (Arévalo *et al.*, 2007).

Luego de la semana 28 a 32 después de siembra y dependiendo la variedad, se inicia el corte del clavel; esta flor tiene diferentes puntos de corte, pero aun así la flor debe salir con la mejor calidad posible, garantizado tallos rectos, sin botones vegetativos y de la longitud adecuada, de tal manera que las flores que no presenten buena calidad o tengan problemas sanitarios, son consideradas como flor nacional y no son desechadas (Castellanos *et al.*, 2010).

2.2 Ecofisiología del clavel

2.2.1 Temperatura

Larson (1988) sostiene que la temperatura es un factor de mucha importancia para el clavel, ya que tiene gran influencia en el desarrollo y la producción exitosa cuando se tiene una temperatura de 16°C en invierno y de 20 a 25°C en verano; cuando las temperaturas están fuera de los rangos anteriores se debe utilizar el sistema de climatización del invernadero, con lo cual se aumentará la producción y la calidad de la flor. Sin embargo, López (1989) indica que el clavel es uno de los cultivos que requiere menores temperaturas y podría ser capaz de resistir algunas heladas moderadas sin ningún tipo de daño y que en realidad, los problemas son debidos a temperaturas altas.

2.2.2 Humedad relativa

Para el desarrollo adecuado de las plantas de clavel en invernadero, la humedad relativa debe permanecer entre 70 y 80%. Es importante tener en cuenta que, si se presenta una humedad relativa menor de la antes mencionada, se favorece el desarrollo de plagas como la arañita roja, mientras que con humedades relativas mayores al 80% se pueden ocasionar problemas de enfermedades fúngicas (Calderón, 2001).

2.2.3 Requerimientos hídricos

La producción de clavel comercial que se lleva a cabo en la Sabana utiliza la tecnología de fertirriego, que podría considerarse de las más modernas en la producción hortícola nacional. Los nutrientes son aportados en forma de fertilizantes solubles inyectados a través del sistema de riego y los transporta disueltos en agua a las plantas; desde el punto de vista agronómico, el fertirriego permite suministrar a las plantas los nutrientes

en cantidades apropiadas y mejor equilibradas, en los momentos en que estas los demandan durante los diferentes estadios de su ciclo fenológico: desarrollo vegetativo, floración y producción (Ortega, 1997; Rodríguez y Flórez, 2012).

2.2.4 Radiación solar

El fotoperiodo tiene un efecto directo sobre la floración, así como en las características de los tallos de las plantas de clavel, ya que las plantas pueden responder de manera diferente según la duración del periodo de luz y de oscuridad. Los fotoperiodos y la intensidad luminosa a diferentes latitudes afectan directamente la calidad de la flor; este hecho puede constituir una herramienta para manipular la producción de las flores. En condiciones ecuatoriales la intensidad luminosa es siempre estable ya que es cercana a 12 horas, lo que permite adelantar un poco la floración (Pizarro de Márquez, 2000). Esto concuerda con lo descrito por Vargas (2013), quien afirma que el clavel requiere un fotoperiodo de 12 horas; durante los días largos se aumenta la producción y la apertura de flores, mientras en días cortos la distancia entre nudos se hace mayor; además, un déficit en la luminosidad ocasiona brotes débiles y retardo en el crecimiento.

2.2.5 Suelos

La marchitez vascular del clavel cuyo agente causal es el *Fusarium oxysporum*, es la mayor limitante de la producción de clavel en suelo, ya que ha provocado pérdidas económicas debido a su difícil control. Por esta razón, la mayoría de los cultivos comerciales se realizan en siembras hidropónicas, sembrada en sustrato, utilizando especialmente cascarilla de arroz, que es un material económico, abundante y de fácil obtención (Baracaldo y Florez, 2010).

En el país se emplea la cascarilla de arroz de diferentes maneras según su porcentaje de tostado: tostada, semitostada o cruda. Tras un proceso de esterilización se puede reutilizar la cascarilla que ya ha salido de las camas de cultivo. Las cáscaras de arroz sin procesar o parcialmente carbonizadas presentan bajas tasas de degradación debido a algunas de sus propiedades como lo son los elevados niveles de sílice, pH entre 6 y 7 que podría considerarse neutro, conductividad hidráulica alta, conductividad eléctrica y capacidad de intercambio catiónico bajos, así mismo, es un material rico diferentes

nutrientes como potasio (3.000 a 3.500 ppm) y fósforo (80 a 120 ppm); sin embargo, es deficiente en nitrógeno (<100 ppm) (Quintero *et al.*, 2009).

2.2.6 Condiciones climáticas y su influencia en el crecimiento y desarrollo

2.2.6.1 Temperatura ambiente

Machado *et al.* (2006) Afirmaron que la temperatura es uno de los factores físicos de mayor importancia del ambiente que influye en los procesos de desarrollo y crecimiento de las plantas, guardando una estrecha interrelación con los procesos fisiológicos y fenológicos que ocurren en ellos; este factor ambiental controla la tasa de desarrollo de una gran cantidad de organismos, que necesitan de la acumulación de una determinada cantidad de calor para pasar de una etapa a otra en su ciclo de vida. Entre los procesos influenciados por la temperatura, Ortiz (1987) incluye la solubilidad de minerales, la absorción de agua, nutrientes y gases, así como varios eventos de difusión que ocurren dentro de la planta.

Como muchos de los procesos biológicos de las plantas, la floración es afectada por la temperatura; el tiempo de duración de la floración depende de la temperatura media diaria. La temperatura controla la tasa de crecimiento y determina qué tan rápido ocurre el desarrollo vegetal (Verberkt *et al.*, 2004). La respuesta de la planta a la temperatura puede ser descrita por el concepto de tiempo térmico, en el cual es necesario que haya una acumulación de cierta cantidad de grados-día y que éstos estén por encima de una temperatura base, para que ocurra un evento de floración (Parra-Coronado *et al.*, 2015); sin embargo, la velocidad del proceso de floración sólo puede ser incrementada por temperaturas más altas y éstas deben tener un punto óptimo, en el cual el grado de progreso de la floración es mayor (Ellis *et al.*, 1990).

2.1.1 2.2.6.2 Radiación solar

Carrasco (2009) afirma que la radiación solar se encuentra entre los principales factores ambientales que afectan la vida en nuestro planeta, influyendo directamente en el funcionamiento de los ecosistemas a través del control de procesos fotobiológicos como la fotosíntesis, fotoperíodo y fototropismo, entre otros; también influye en otras variables

ambientales como la humedad y la temperatura, que finalmente inciden en la distribución y comportamiento de los organismos. Por lo que, el desarrollo de los órganos de las plantas, como el fruto, está íntimamente relacionados con el uso de la luz; la reducción en la intensidad de la luz afecta directamente la inducción y diferenciación de botones florales, así como la formación de los frutos, su tamaño, la intensidad del color y la calidad de los frutos, y en menor medida el crecimiento (Dussi, 2007).

Mavi y Tupper (2004) clasifican la manera como las plantas perciben la radiación solar en tres diferentes formas: la intensidad lumínica que es la cantidad de energía radiante por unidad de tiempo, la calidad de luz que es la distribución espectral de la radiación y las horas luz por día que se refiere al fotoperiodo. Sin embargo, la radiación que llega a la tierra abarca una amplia gama del espectro electromagnético y aproximadamente el 40% de ella es la que conocemos como luz o radiación visible, de 400 a los 700 nm, usada por las plantas en el proceso de la fotosíntesis, por lo que es denominada radiación fotosintéticamente activa (PAR). Otro rango de radiación, de 280 nm a 1.000 nm, es conocido como rango fotobiológico; cuyas longitudes de onda son de importancia en procesos fotobiológicos bajo control de fotorreceptores específicos, como por ejemplo los fitocromos (Carrasco, 2009).

2.2.6.3 Humedad relativa (HR)

El vapor de agua presente en la atmósfera, dada por la humedad relativa, afecta el crecimiento y desarrollo del cultivo además de la calidad de la fruta producida. Según Dorais y Ehret (2008), el factor ambiental más importante que afecta el estado hídrico de la planta es la HR, ya que afecta los procesos relacionados con la transpiración, como el equilibrio hídrico y el transporte de iones.

Bakker (1984) afirma que existen tres consecuencias dañinas para las plantas cuando se presenta una humedad ambiental alta: la primera es el daño por calor, que ocurre por una reducción en el enfriamiento por una menor transpiración; en segundo lugar, la fuerte resistencia; en última instancia, reducir la transpiración por alta HR reducirá la transferencia de ciertos iones de raíz a brotes.

2.3 Modelos matemáticos y simulación

La necesidad de información para tomar decisiones en agricultura está aumentando rápidamente debido a la demanda creciente de productos agrícolas, haciendo imprescindible un manejo cada vez más eficiente de los recursos que permita aumentar los rendimientos agrícolas, por lo cual la obtención de nuevos datos mediante la experimentación agronómica y la publicación posterior de los resultados no es suficiente para cubrir esta demanda creciente de información (Jones *et al.*, 2003).

Salazar (2006) reitera que estructurar, formular y aplicar modelos de simulación de plantas ha sido de gran utilidad en los últimos años, tanto en horticultura como en otras áreas de la producción vegetal, por su utilidad en el apoyo a la toma de decisiones relacionadas con el manejo adecuado de las plantas. La idea inicial de los modelos de crecimiento de los cultivos parte de la necesidad de integrar los conocimientos de suelo, clima, cultivos y prácticas agrícolas en una herramienta que facilite la toma de decisiones acertadas, a la hora de transferir tecnología agrícola desde una localidad a otras, con diferentes suelos y climas (IBSNAT, 1993).

Hernández *et al.* (2009) afirman que los estudios de simulación muestran tanto ventajas como desventajas; algunas de las ventajas son:

- Los modelos de simulación posibilitan la evaluación y comparación de las alternativas de diseño y de los modos de operación de un sistema.
- La simulación permite la selección de las mejores alternativas y permite la optimización de las operaciones.
- La simulación matemática es una herramienta que permite el estudio de fenómenos reales que no pueden ser evaluados analíticamente.
- Los modelos de simulación permiten estimar el comportamiento del sistema, realizar cambios en las entradas del modelo y probar si estos cambios conducen a mejoras sin interrumpir el comportamiento del sistema real.

- Permiten un uso eficiente de los recursos, ya que el desarrollo y comportamiento del sistema durante largos periodos de tiempo se puede valorar en tan solo algunos minutos de simulación.

Dentro de las desventajas del uso de modelos, se mencionan:

- Desarrollar y refinar modelos de simulación suele ser costoso, requiere de tiempo y equipo informático y de personal.
- Se generan estimaciones, no resultados exactos. Esto significa que se deben utilizar métodos estadísticos que puedan determinar la confiabilidad de los resultados obtenidos.
- Es difícil probar la validez de un modelo. Los resultados no tendrán utilidad si el modelo no es válido, porque no reflejarían el comportamiento del sistema del mundo real que se desea estudiar.

2.3.1 Clases de modelos

Los modelos son instrumentos que permiten sintetizar conocimientos, corroborar hipótesis, explicar y comprender sistemas complejos y establecer analogías entre diferentes situaciones. Los modelos sirven como soporte para la toma de decisiones gerenciales y la planificación de la producción; estos representan simplificada un sistema real, donde se describen las variables dependientes e independientes de interés y la relación entre ellas, sus características y restricciones, mediante símbolos, diagramas y ecuaciones, considerándose como un método eficiente para reducir y entender la complejidad de los sistemas (Candelaria *et al.*, 2011; García, 2008; Lentz, 1998; Marcelis *et al.*, 1998). El objetivo de la modelación es crear un modelo que opere y produzca una imitación lo más cercana posible al mundo o situación real a través de un proceso conocido como simulación (Salazar, 2006). Candelaria *et al.* (2011) afirman que existen diferentes tipos de modelos, en función de la finalidad para la cual se crean o diseñan. Una primera clasificación se basa en su dimensión, función, propósitos y grado de abstracción, y estos pueden ser descriptivos o de simulación. Penning de Vries *et al.* (1989) afirman que los modelos descriptivos, estadísticos o empíricos, tienen como característica reflejar poco o nada de los mecanismos causales del comportamiento de

un sistema y tratan de establecer relaciones causa-efecto y realizar una descripción cuantitativa de los mecanismos y procesos que afectan un sistema. Al respecto de los modelos de simulación de cultivos, Jame y Cutforth (1996) indican que las principales razones que motivan su construcción se relacionan con la mejor comprensión de los procesos que intervienen en la producción de un cultivo, así como con el uso del modelo como una herramienta en el manejo de los sistemas agrícolas.

Quinteros *et al.* (2006) proponen cuatro tipos de modelos con base en las capacidades de representar la dinámica y control de los componentes e interacciones del sistema:

1. Los modelos estáticos, se usan cuando se representa un sistema en un solo instante de tiempo en particular, o bien para representar un sistema en donde el tiempo no es importante, por ejemplo, simulación Montecarlo.
2. Los modelos dinámicos, representan sistemas en los que las variables son funciones del tiempo, permitiendo predecir su desarrollo en un periodo dado; este tipo de modelos es de gran importancia para representar procesos biológicos.
3. Los modelos determinísticos, no consideran la variación estocástica y, por lo tanto, no se comportan de manera probabilística. Los datos de entrada y las relaciones existentes en el sistema son especificados al inicio, es decir, no influye el azar en los resultados.
4. Los modelos estocásticos consideran que al menos una de las variables que definen el comportamiento del sistema se muestra aleatoria y entonces el resultado es al menos en parte variable. Se comportan de manera probabilística.

2.3.2 Modelos aplicados a simulación de cultivos

Según Gormley y Sinclair (2003), en el desarrollo de la ciencia se han diseñado y aplicado modelos durante siglos en diferentes disciplinas; sin embargo, los relacionados con los procesos agrícolas y ambientales se han implementado en las últimas décadas. Esto obedece a que en diferentes situaciones es más fácil trabajar con los modelos que con los sistemas reales, ya sea porque el sistema es demasiado grande y complejo, por

limitación de recursos humanos y económicos, o por la imposibilidad de experimentar en dichos sistemas. Es por lo que en la investigación y planificación agrícola el desarrollo de modelos para simular diferentes procesos relacionados con su eficiencia se ha convertido en una práctica común que, sustentada con la información científica disponible, es útil para pronosticar resultados en situaciones y condiciones específicas, lo que permite plantear nuevas hipótesis y orientar la investigación o el manejo hacia los puntos más críticos (Candelaria *et al.*, 2011).

Para modelar y simular sistemas de producción agrícola, según Jones *et al.* (1987) se sugieren los siguientes pasos:

- Establecer objetivos claros y definir la información que se obtendrá del problema y la simulación.
- Definir la estructura del sistema, sus linderos, ingresos y salidas.
- Realizar una revisión exhaustiva de la información disponible.
- Desarrollar modelos con diagramas que muestren la estructura del sistema y sus interrelaciones.
- Representar los modelos mediante un lenguaje de programación estructurado para computadora
- Comprobar, calibrar y validar el modelo. La comprobación consiste en determinar la precisión con la que el código computacional representa el modelo.
- La calibración consiste en estimar los parámetros requeridos por el modelo y la validación es el proceso mediante el cual se comparan los resultados obtenidos por la simulación con los datos que no se utilizaron previamente en ninguna etapa de la calibración o el desarrollo del modelo.

- Realizar un Análisis de Sensibilidad, con el fin de identificar los parámetros del modelo que tienen más peso y observar cómo cambia la salida cuando se modifican los parámetros.
- Utilizar el modelo desarrollado.

Una simulación consiste en diseñar un modelo a partir de conocimiento previo sobre un sistema real, para experimentar con él y entender el comportamiento de ese sistema, de modo que en el futuro sea posible predecirlo. Esta capacidad de predicción permite evaluar estrategias y alternativas de gestión, comparar resultados y tomar decisiones acerca del sistema en estudio, para optimizar inversiones, reducir costos o disminuir vulnerabilidades, daños y pérdidas, en función del período y de las actividades y prioridades que interesan a los actores involucrados (IICA, 2005).

Salazar (2006) afirma que la formulación, construcción y aplicación de modelos de simulación en la agricultura se han utilizado en los últimos años porque son de gran utilidad para la toma de decisiones, al permitir aprovechar la información, generando respuestas para el adecuado manejo de los cultivos. Los modelos se utilizan como soporte para la toma de decisiones de manejo y planeación de la producción (Lentz, 1998; Marcelis *et al.*, 1998).

Un sistema agrícola es altamente complejo, caracterizado por múltiples variables de entrada con comportamiento caótico o desconocido. El modelado matemático en la investigación agrícola es, por lo tanto, esencialmente un proceso empírico con pocas consideraciones teóricas factibles y una libre elección de modelos matemáticos de sistemas agrícolas. La forma más fácil de hacer modelos empíricos es usar modelos lineales (Parra-Coronado *et al.*, 2015).

2.3.3 Modelos fenológicos y tiempo térmico

El cultivo se desarrolla dependiendo principalmente de la temperatura y la duración del día. Sin embargo, en las regiones tropicales, la temperatura se considera la variable ambiental que tiene mayor impacto en el desarrollo de las plantas. La temperatura tiene una función reguladora, afectando reacciones enzimáticas que intervienen en el proceso

de desarrollo directa o indirectamente (Baker y Reddy, 2001; Bonhomme, 2000; Normand y Léchaudel, 2006; Pulido, 2008).

López *et al.* (2010) señalan que la combinación del tiempo y la temperatura en la agricultura genera el llamado tiempo térmico (TT) o “suma de calor, grados día, grados día de desarrollo, unidades de calor” (Ruiz-Corral *et al.*, 2002) o “tiempo fisiológico, definido como el número de grados días necesarios para completar un determinado proceso de desarrollo o etapa fenológica” (Parra-Coronado *et al.*, 2015; Trudgill *et al.*, 2005). Con base en el tiempo térmico, se calcula la tasa de aparición de nudos, inflorescencias, hojas y el desarrollo de los frutos (Normand y Léchaudel, 2006; Almanza *et al.*, 2010), así como para estimar términos como la producción potencial (Salazar *et al.*, 2008).

Bordón y Blasco (2018) afirman que la temperatura acumulada o integral térmica es la suma de las temperaturas medias diarias, por encima de un umbral de temperatura que, en general, coincide con el cero de vegetación de la especie o variedad; el total sumado se denomina tiempo térmico o suma de calor y se expresa en grados-día (GD) acumulados. Mediante esta integral térmica se puede predecir aproximadamente cuándo un cultivo alcanza un determinado estadio fenológico como la floración o la madurez de los frutos o semillas (Parra-Coronado *et al.*, 2015); las diferentes variedades de cultivo de una misma especie serán más precoces cuanto menores sean sus requerimientos de calor.

Muchas especies están adaptadas a rangos particulares de temperatura; así, a medida que la temperatura media (T_i) disminuye, el desarrollo se reduce, hasta llegar a temperatura límite, donde el desarrollo se detiene; a esta temperatura se denomina “temperatura base (T_b)”. Por otro lado, cuando la temperatura aumenta, las tasas de desarrollo se incrementan hasta una temperatura óptima (T_o), en donde empiezan a disminuir y posteriormente se detienen en su temperatura máxima de desarrollo (T_m) (Trudgill *et al.*, 2005).

Para conocer el requerimiento térmico del cultivo en relación con su desarrollo fenológico, Flores *et al.* (2014) afirmaron que el principio de este método es considerar cuando la temperatura media diaria excede un determinado umbral conocido como temperatura base.

El cálculo del tiempo térmico se puede llevar a cabo a través de varios métodos. Parra-Coronado *et al.* (2015) afirmaron que “la mejor manera de representar la duración de una fase fenológica es en términos de tiempo térmico, expresado como la sumatoria de los grados día de desarrollo (crecimiento)”, donde un grado día se acumula cuando la temperatura media diaria está por encima de la temperatura base (T_b) para un período de 24 horas. “Para el modelo fenológico propuesto para la feijoa cv. Quimba, la fecha de partida es esencial para realizar un seguimiento en el desarrollo del cultivo; el tiempo de cada fase fenológica en términos de grados-día de desarrollo se determinó usando los valores de temperatura base y el tiempo térmico se calculó como la sumatoria de la diferencia entre la temperatura media diaria y la temperatura base para cada etapa fenológica (Ecuación 1)” (Parra-Coronado *et al.*, 2015).

$$TT = \sum_{i=1}^n GDC_i = \sum_{i=1}^n (T_i - T_b) \quad o \quad TT = \sum_{i=1}^n T_i - nT_b \quad (1)$$

“Donde, TT es el tiempo térmico acumulado durante los n días hasta que aparezca un nuevo estadio de desarrollo, T_i es la temperatura media diaria ($^{\circ}\text{C}$) para el día i y T_b es la temperatura base ($^{\circ}\text{C}$). Los grados día de desarrollo (GDD_i) para la acumulación de TT fueron calculados utilizando las siguientes consideraciones” (Parra-Coronado *et al.*, 2015)

:

$$T_i = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \quad (2)$$

$$\text{Si } T_i > T_b, \quad GDC_i = T_i - T_b \quad (3)$$

$$\text{Si } T_i < T_b, \quad GDC_i = 0 \quad (4)$$

“Donde $T_{m\acute{a}x}$ es la temperatura máxima ($^{\circ}\text{C}$) para el día i y $T_{m\acute{i}n}$ es la temperatura mínima ($^{\circ}\text{C}$) para el día i ” (Parra-Coronado *et al.*, 2015).

2.3.4 Métodos de estimación de la temperatura base (T_b)

La importancia de la determinación del valor de T_b y el cálculo de los GDD para un cultivo radica en que una vez se determinan estos valores, la tasa y duración de un

proceso o fase fenológica se pueden calcular fácilmente (Trudgill *et al.*, 2005). Slafer y Rawson (1995) establecieron que el método más preciso para determinar la temperatura basal es cultivar plantas en un ambiente controlado, exponerlas a diferentes áreas de temperatura constante y medir la tasa de aparición de órganos de plantas según la etapa de desarrollo. Asumiendo que cada etapa de desarrollo tiene una temperatura base diferente, estas deben ser similares para un determinado estadio de desarrollo del cultivo, en cualquier época de crecimiento (Salazar-Gutiérrez *et al.*, 2013); estadísticamente, se pueden utilizar varios métodos para estimar esta temperatura base y la literatura reporta diferentes métodos para determinarla.

Arnold (1959) fue uno de los primeros en realizar estudios de la temperatura base en las diferentes variedades y etapas fenológicas, para lo cual describe los siguientes métodos:

1. Método de menor variabilidad: a partir de una serie de datos de siembra se calcula la suma de unidades térmicas a floración probando distintas temperaturas base, y por eliminación se elige la de menor variabilidad que es determinada por medio del coeficiente de variación. Considerando la importancia del sistema de unidades térmicas como herramienta, se transformó por medio de una fórmula el desvío en unidades térmicas, a desvío en días de la siguiente forma:

$$dd = \frac{ds}{(Xt - Tb)} \quad (6)$$

dd = Desvío en días (+/-)

ds = Desvío estándar en grados día (Unidades térmicas)

Xt = Temperatura media durante todo el desarrollo del cultivo hasta el estado fenológico de interés

Tb = Temperatura base

El desvío en días tiene un similar comportamiento que el coeficiente de variación, y la temperatura base correcta será aquella que tenga el menor desvío en días

2. Método del coeficiente de regresión: este método se apoya en la relación entre la temperatura media del ciclo de desarrollo (variable independiente) y la suma de unidades térmicas (variable dependiente). Se calcula una ecuación de regresión y por medio del coeficiente de regresión se pueden evaluar las temperaturas base probadas. Cuando el valor es positivo significa que la temperatura usada es demasiado alta, así mismo cuando es negativo la temperatura es demasiado baja. Un valor cero indica que la temperatura base es la correcta.
3. Método del intercepto x: este método elimina el paso de cálculo de unidades térmicas para cada temperatura base probada, utilizada en el método del coeficiente de regresión y se basa en dos datos por siembra, en la temperatura media de desarrollo del ciclo y en la tasa de desarrollo que se puede medir como el inverso de la duración en días o tasa equivalente. Con estos valores se calcula la ecuación de regresión, siendo ubicada la temperatura media en el eje de las abscisas y en el eje de las ordenadas la tasa de desarrollo equivalente. Finalmente, para obtener la temperatura base se resuelve la ecuación con $y=0$ donde gráficamente el valor se representa en el intercepto de la recta con el eje de las abscisas.

Pulido (2008), en su investigación sobre modelos fenológicos, presenta tres metodologías en el cálculo de la temperatura base:

1. La mínima desviación estándar de la suma de tiempo térmico para una serie de datos; en este método se selecciona la temperatura base que reduce al mínimo la variación en los GDD para una serie de datos.

$$SDgdd = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (gdd_i - Mgdd)^2}{n-1} \right]^{1/2} \quad (7)$$

Donde: $SDgdd$ es la mínima desviación estándar en gdd , gdd_i son los grados día de las *iesimas* siembras, $Mgdd$ es la media de todos los grados día de todas las siembras, y n es el número de siembras.

2. Minimización de la desviación estándar, expresada en días, que corresponde a la suma del tiempo térmico. Este método requiere la selección de la temperatura base a partir de una serie de temperaturas propuestas.

$$SD_{dia} = \frac{SD_{gdd}}{x_t - T_b} \quad (8)$$

Donde: SD_{dia} es la desviación estándar en días, SD_{gdd} es la desviación estándar en gdd , x_t es el promedio total de temperatura de todas las siembras y T_b la temperatura base.

3. Método de la tasa de desarrollo o intercepción de x . La fórmula general de este método es $1/f = a + bTi$, donde f es el número de días entre los estadios de desarrollo, $1/f$ es la tasa de desarrollo, a es el intercepto, b el coeficiente de regresión y Ti es la temperatura media. Cuando la tasa de desarrollo $1/f = 0$, la temperatura base es $-a/b$.

Salazar (2006) presenta una metodología para determinar las temperaturas base para diferentes estadios fenológicos de uchuva (*Physalis peruviana*), evaluadas en cuatro sitios diferentes, minimizando la variación de los tiempos térmicos en cada sitio para los valores adjudicados de T_b . Este proceso de minimización se realizó de manera analítica ajustando la ecuación cuadrática de varianza resultante para derivar la T_b en la cual se obtiene la varianza mínima. De igual manera, se puede cuantificar mediante un proceso no lineal que, a través de iteraciones de T_b , se obtiene el valor mínimo de la varianza usando la herramienta SOLVER del programa EXCEL. Esta misma metodología fue utilizada por Salazar-Gutiérrez *et al.* (2013), en el cultivo de trigo de invierno (*Triticum aestivum* L.) y Parra-Coronado *et al.* (2015), en el cultivo de feijoa (*Acca sellowiana* (O. Berg) Burret), quienes determinaron las T_b para los estados fenológicos reproductivos, correspondientes a aquellos valores de T_b para los cuales se hace mínimo el coeficiente de variación.

Finalmente, Parra-Coronado *et al.* (2015) reportan la Varianza Mínima (VAR) para GDD, Desviación Estándar Mínima (SD) para GDD, SD Mínima Diaria, Coeficiente de Variación Mínimo (CV) para GDD y Regresión Lineal con Coeficiente de Regresión e Intersección x , como métodos estadísticos que pueden ser utilizados para la estimación de la temperatura base.

2.4 Bibliografía

Almanza, P., M. Rico, G. Fischer, B. Chaves, y H. Balaguera-Lopez. (2010).

Caracterización físico-química del fruto de la uva (*Vitis vinifera* L.) 'Pinot Noir' durante su crecimiento y desarrollo en condiciones de trópico alto. *Agronomía Colombiana*, 28(2): 173-180.

Arévalo, G., D. Ibarra, y V. Flórez. (2007). Desbotone en diferentes estadios de desarrollo del botón floral en clavel estándar (*Dianthus caryophyllus* L.) var. Nelson. *Agronomía Colombiana*, 25(1): 73-82.

Arnold C. (1959). The determination and significance of the base temperature in a linear heat unit system. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.*, 74: 430-445

Bakker, J. C. (1984). Physiological disorders in cucumber under high humidity conditions and low ventilation rates in greenhouses. *Acta Hort.* 156: 257-264.

Baker, J. T. y Reddy, V. R. (2001). Temperature effects on phenological development and yield of muskmelon. *Annals of Botany*, 87(5): 605- 613.

Baracaldo, A. y V. Florez. (2010). Tasas e índices de crecimiento a segundo pico de cosecha en clavel estándar cv. Nelson cultivado en suelo y en sustratos. *Agronomía Colombiana*, 28(2): 209-217.

Bonhomme, R. (2000). Bases and limits to using 'degree.day' units. *European Journal of Agronomy*, 13: 1-10.

Bordón F. y A. E. Blasco. (2018). Planificación de cultivos, Editorial Síntesis S.A., España.

Candelaria, B., O. Ruiz, F. Gallardo, P. Pérez, A. Martínez y L. Vargas. (2011). Aplicación de modelos de simulación en el estudio y planificación de la agricultura, una revisión. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 14(3), 999-1010.

Carrasco Ríos Libertad, (2009). Efecto de la radiación ultravioleta-β en platas. *IDESIA*, 27(3): 59-76

Castellanos D.O., Fonseca R.S. y Burutica O.S. (2010). Agenda prospectiva de investigación y desarrollo tecnológico para la cadena de la productividad de flores y follajes en Colombia con énfasis en clavel. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. Bogotá D.C. Colombia

Castilla, Y., González, M. Lara, R. (2014). Determinación de estabilidad genética en vitroplantas de clavel español (*Dianthus caryophyllus* L.), micropropagadas con Biobras-16. *Cultivos Trop.* 35: 7-74.

- Dona A. J., Fatmi M. U., Singh D. y Benny J.C. (2017)** Evaluation of carnation (*Dianthus caryophyllus* L.) Varieties under naturally ventilated polyhouse, *Plant Archives*, 17(2): 1262-1266
- Dorais, M. & Ehret, D. L. (2008)**. Cap. 14. Agronomy and the nutritional quality fruit. En: Improving the health-promoting properties of fruit and vegetable products. Edited by F A Tomás-Barberán, M I Gil. España.
- Dussi, M. C. (2007)**. Intercepción y distribución lumínica en agroecosistemas frutícolas. pp. 200-241. En: Sozzi, G. O. (ed.). 2007. Árboles frutales: Ecofisiología, cultivo y aprovechamiento. Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires.
- Ellis. R., Hadley, P., Roberts, E. & Summerfield, R. (1990)**. Quantitative relations between temperature and crop development and growth. In: Jackson, M. T., Ford-Lloyd B. V., Parry, M. L., eds. Climatic change and plant genetic resources. London: Belhaven Press, 85-115
- Filgueira, J. (2011)**. Experiencias en mejoramiento del clavel (*Dianthus caryophyllus* L.). Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia. ISBN 978-958-8403-41-0. Tomás-Barberán and M.I. Gill. CRC Press LLC, Boca Raton, FL 33487, USA. pp. 346-357.
- Flores H., Flores-Gallard H. y Ojeda W. (2014)**. Predicción fenológica del cultivo de papa mediante tiempo térmico. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 37: 149-157. Doi: 10.35196/rfm.2014.2.149.
- García, J. M. (2008)**. Teoría y ejercicios prácticos de Dinámica de Sistemas. Fundación Universitaria Politécnica de Catalunya (UPC). Cataluña, España. 84 p.
- Gormley, H. y Sinclair L. 2003**. Modelaje participativo del impacto de los árboles en la productividad de las fincas y la biodiversidad regional en paisajes fragmentados en América Latina. *Agroforestaría en las Americas*, 10: 103-108.
- Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). 2005**. Modelos de simulación y herramientas de modelaje: elementos conceptuales y sistematización de herramientas para apoyar el análisis de impactos de la variabilidad y el cambio climático sobre las actividades agrícolas. 1ra edición, San José – Costa Rica <https://repositorio.iica.int/bitstream/handle/11324/3045/BVE17068957e.pdf;jsessionid=03EBCD5866959737B8067CCCCE91B862?sequence=1>
- IBSNAT, International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer, 1993**. The IBSNAT decade. Department of Agronomy and Soil Science, College of Tropical Agriculture and Human Resources, University of Hawaii. Honolulu, HI 96822 Hawái (EEUU).

- Hernández, F., Soto, F., y Caballero, A. (2009).** Modelos de simulación de cultivos. Características y usos. *Cultivos Tropicales*, 30(1): 73-82
- Hilverda Kooij. (2010).** Directivas de cultivo de claveles [internet]. Hilverda Kooij plant technology, Holanda. En: www.hilverdakooij.nl; consulta: 15 de octubre, 2018.
- Jame, Y. W. & Cutforth, H. W. 1996.** Crop growth models for decision support systems. *Canadian Journal of Plant Science*, 76:9-19.
- Jones, J. W., Mishoe, J. W. & Boote, K. (1987).** Introduction to simulation and modeling. Technical Bulletin No 100. Taipei, ASPAC Food and Fertilizer Technology Center.
- Jones, J. W., Hoogenboom, G., Porter, C. H., Boote, K. J., Batchelor, W D., Hunt, L. A., Wilkens, P. W., Singh, U., Gusman, A. J., Ritchie, J. T. (2003).** The DSSAT cropping system model. *Eur. J. Agron.* 18: 235-265.
- Larson, R. A. (1988).** Introducción a la Floricultura. Departamento de Ciencia Hortícola de la Universidad del Estado de Carolina del Norte, A.G.T. Editor S.A. México D.F. pp. 43-72
- López, M. J. (1989).** Producción de Claveles y Gladiolos. Ed. Mundi Prensa. Madrid-España, pp. 9-77
- López, M. A., Chaves, B., Flórez, V. J., Salazar, M. R. (2010).** Modelo de aparición de nudos en clavel (*Dianthus caryophyllus* L.) cv. Delphi cultivado en sustratos. *Agronomía Colombiana*, 28(19): 47-54.
- Lentz, W. 1998.** Model applications in horticulture: a review. *Scientia Horticulturae*, 74: 151-174.
- Machado, N., Regina, M., Gatti A., y Mendes, C. 2006.** Temperature effects on seed germination in races of common beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Acta Sci. Agron.*, 28: 155164.
- Marcelis, L. F. M., Heuvelink, E., y Goudriaan, J. (1998).** Modelling biomass production and yield of horticultural crops: a review. *Scientia Horticulturae*, 74:83-111.
- Mavi, H. S. & Tupper, G. J. (2004).** Agrometeorology. Principles and applications of climate studies in agriculture. Food Products Press, New York, NY.
- Normand, F. y Léchaudel, M. (2006).** Toward a better interpretation and use of thermal time models. *Acta Hort.*, 707: 159-164.
- Ortega, D. (1997).** Fertirrigación en cultivos de flores. En: Silva, F. (Ed.). Fertirrigación. Bogotá: Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. pp. 135-147.
- Ortiz S. (1987).** Elementos de agroclimatología cuantitativa. 3ª. ed. UACH. Chapingo. México

Parra-Coronado, A. (2014). Efactor de las condiciones climáticas en el crecimiento y calidad poscosecha del fruto de la feijoa (*Acca sellowiana* (O. Berg) Burret). [Archivo PDF]

<https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/52475/07797095.2014.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Parra-Coronado, A., Fischer, G. y Chaves-Córdoba, B. 2015. Tiempo térmico para estados fenológicos reproductivos de la feijoa (*Acca sellowiana* (O. Berg) Burret). *Acta Biológica Colombiana*, 20(1): 163-173. Doi: 10.15446/abc.v20n1.43390

Penning de Vries, F. W. T., Jansen, D. M., Berger, H. F. M., & Bakema, A. (1989). Simulation of ecophysiological processes of growth in several annual crops. Simulation monographs No. 29. Wageningen: Pudoc. 271 p.

Pizano de Márquez, M. (2000). Clavel *Dianthus caryophyllus*. Ediciones HortiTecnia, Bogotá.

Pulido, S. P. (2008). Desarrollo de un modelo fenológico de Lulo (*Solanum quitoense* Lam.) var. Septentrionale. Tesis de maestría, Facultad de Agronomía. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. 84 p.

Quintero C., González-Murillo C., Flórez J. & Guzmán J. 2009. Physical evaluation of four substrates for cut-rose crops. *Acta Horticulturae*, 843: 349-358.

Quinteros, M., Alonso, A., Escudero, L., Guignard, M. & Weintraub, A. (2006). Una aplicación de programación estocástica en un problema de gestión forestal. *Revista Ingeniería de Sistemas*, 20: 67-95

Rodríguez S., M. & V. J. Flórez R. (2012). Changes in EC, pH and in the concentrations of nitrate, ammonium, sodium, and chlorine in the drainage solution of a crop of roses on substrates with drainage recycling. *Agronomía Colombiana*, 30(2): 266-273

Ruiz-Corral, J., Flores-López, H., Ramírez-Díaz, J., y González-Equiarte, D. (2002). Temperaturas cardinales y duración del ciclo de madurez del híbrido de maíz H-311 en condiciones de temporal. *Agrociencia*, 36: 569-577.

Salazar, M.R. (2006). Un modelo simple de producción potencial de uchuva (*Physalis peruviana* L.). Tesis de Doctorado en Ciencias Agropecuarias – Área Agraria. Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

Salazar, M. R., Jones, J. W., Chaves, B., y Cooman, A. (2008). A model for the potential production and dry matter distribution of Cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.). *Scientia Horticulturae*, 115: 142-148.

Salazar-Gutiérrez, M. R., Johnson, J., Chávez-Córdoba, B., y Hoogenboom, G. (2013). Relationship of base temperature to development of winter wheat. *Int. J. Plant Prod.*, 7(4): 741-762.

Slafer, G. A., y Rawson, H. M. (1995). Rates and cardinal temperatures for processes of development in wheat: Effects of temperature and thermal amplitude. *Austr. J. Plant Physiol.*, 22: 913-926.

Trudgill, D. L., Honek, A., Li, D., y Van Straalen, N. M. (2005). Thermal time - Concepts and utility. *Annals of Applied Biology*, 146: 1-14.

Vargas Moreta, M. V. (2013). Determinación de las curvas de acumulación de nutrientes en las variedades de Clavel Nelson y Dakota (*Dianthus caryophyllus*), Pujilí-Cotopaxi.

Verberkt, H., Hiens, R. y Blom, T. (2004). Supplemental Lighting in Potted Plants. *Lighting up Profits. Based on Greenhouse Grower Articles.* Ohio, USA. pp. 54-58.

Vohnout, K. D. (2003). Mathematical modeling for system analysis in agricultural research. Elsevier Science B.V. Amsterdam, The Netherlands. 453 p.

Whealy, C. A. (1992). Carnations. pp. 43-64. En: Larson, R.A. (Ed.), *Introduction to Floriculture*, 2nd ed. Academic Press, San Diego.

3. Temas de Investigación y artículos

3.1 Descripción del desarrollo fenológico para el cultivo comercial de clavel (*Dianthus caryophyllus* L.)

Resumen

El clavel es una de las flores de corte más utilizadas en el mundo, y a pesar de su relevancia para la agroindustria en el mundo, muchos aspectos básicos de su crecimiento y desarrollo aún están por estudiar, ya que no existe una descripción del proceso de crecimiento del clavel. El estudio fue realizado en una finca de producción de clavel ubicada en el municipio de Tocancipá – Cundinamarca (Colombia), con el objetivo de establecer y describir los estados de desarrollo vegetativo y reproductivo de tres variedades de clavel cultivadas comercialmente, desde el momento del pinch hasta el corte. Se realizó un estudio de crecimiento monitoreando los tallos de tres variedades diferentes en sus etapas vegetativa y reproductiva; se determinaron los principales estadios de desarrollo visibles y la duración en días de cada una de esas etapas desde la siembra hasta la cosecha de las flores. Se construyó la escala BBCH general para el cultivo comercial de clavel, donde se determinaron cinco estadios principales. Las tres variedades evaluadas presentaron un tiempo diferente para la obtención de la cosecha. La variedad Diletta es la más precoz con un ciclo de vida de 166 días desde la siembra hasta el final de la cosecha, mientras que las variedades Mizuky y Zafiro son más tardías con 187 y 185 días, respectivamente.

Palabras clave: Fenología, Desarrollo, Escala BBCH, Variedades, Cosecha.

Abstract

The carnation is one of the most used cut flowers in the world, and despite its relevance for agribusiness in the world, many basic aspects of its biology have yet to

be studied, since there is no description of the carnation growth process. The study was carried out in a carnation production farm located in the municipality of Tocancipa -- Cundinamarca (Colombia), with the objective of establishing and describing the stages of vegetative and reproductive development of three commercially grown varieties of carnation, from the moment of *pinch* until cutting. A growth study was carried out monitoring the stems of three different varieties in their vegetative and reproductive, and the main visible stages of development and the duration in days of each of these stages from planting to harvesting the flowers were determined. The general BBCH scale was constructed for commercial carnation cultivation, where five main states were determined. The three varieties evaluated presented a different time to obtain the harvest. The Diletta variety is the earliest with a life cycle of 166 days, from planing to the end of harvest, while the Mizuky and Zafiro varieties are later with 187 and 185 days, respectively. It is recommended to continue studying the development stages based on the accumulation of temperature in degrees days, with which it is possible to predict the harvest time of each variety of carnation.

Keywords: Phenology, Development, BBCH Scale, Varieties, Harvest.

3.1.1 Introducción

El clavel (*Dianthus caryophyllus* L.) es una planta herbácea perenne que se encuentra en la familia Caryophyllaceae con hojas opuestas, flores perfectas solitarias que son terminales en el tallo y cada planta produce de siete a diez flores de calidad por ciclo. La planta produce una de las flores cortadas más populares, económicas e importantes del mundo debido a la floración perpetua y a la presencia de nuevos cultivares simples y multicolores (Whealy, 1992). En la industria existen diversas variedades de clavel de múltiples colores de interés comercial, su vida en florero, fácil transporte y tanto la producción como la exportación son de importancia para muchos países (Castilla *et al.*, 2014; Hilverda Kooij, 2010).

El crecimiento es el incremento en masa seca, volumen, longitud o área que resulta de la división, expansión y diferenciación de células (Lambers y Oliveira, 2019). Solamente un incremento de masa seca puede no coincidir con cambios en cada uno de estos componentes del crecimiento, p.e., divisiones celulares, a menudo inician el

crecimiento, pero la división celular por sí sola es insuficiente para provocar crecimiento. La tasa de crecimiento de la planta es el resultado tanto de su composición genética, antecedentes y el entorno en el que crece y se desarrolla (Kochhar y Gujral, 2020; Lambers y Oliveira, 2019). Los controles externos para el crecimiento son ambientales como la luz, la temperatura, la humedad y la gravedad; muchas variables ambientales parecen actuar al menos en parte alterando la expresión genética o las funciones hormonales (Kochhar y Gujral, 2020). La temperatura es la variable ambiental de mayor importancia en los procesos de desarrollo de las plantas (Machado *et al.*, 2006; Parra-Coronado *et al.*, 2015).

La fenología es un instrumento ampliamente utilizado para entender mejor los ciclos de crecimiento de las plantas y es descrita por medio de estadios particulares, tales como la formación y desarrollo de hojas, floración, fructificación, dispersión de semillas y germinación; cada uno de estos eventos tiene un momento específico en el año y un curso de desarrollo característico (Fenner, 1998). La aparición, transformación o desaparición rápida de los órganos vegetales se llama fase fenológica y esta se determina por los cambios morfológicos o fisiológicos de la planta. El intervalo entre dos fases fenológicas constituye la etapa o estadio fenológico; el tiempo de cambio entre las fases depende de los diferentes eventos que pueden afectar las plantas como lo es el clima o los estados de estrés biótico o abiótico, ya que afectan la fisiología de la planta; la alteración de la fisiología lleva a alteraciones en el ciclo normal del crecimiento y del desarrollo de la planta (Azkues, 2000; Hormaza *et al.*, 2010).

La escala BBCH (Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt and Chemical Industry) surgió como respuesta a la necesidad de crear un vocabulario común que permitiera unificar bajo un solo código las diferentes especies vegetales, con base únicamente en características fenológicas de la planta (Hack *et al.*, 1992). Es un sistema de codificación para todas las especies de plantas monocotiledóneas y dicotiledóneas; con esta escala el ciclo completo de desarrollo de las plantas se subdivide en 10 fases principales claramente distinguibles en un código decimal, la cual divide los estadios de crecimiento entre principal y secundario. Los estadios principales de crecimiento se describen usando números del 0 al 9 en orden ascendente (Meier, 2018)

Castellanos *et al.* (2010) describen el ciclo productivo del clavel con base en las condiciones comerciales y de producción que existen en Colombia, estimando que el clavel tiene un ciclo de producción de dos años, con un inicio de producción a partir del sexto mes; el periodo anterior es de crecimiento vegetativo.

El objetivo de esta investigación fue establecer y describir los estados de desarrollo vegetativo y reproductivo de tres variedades del clavel, desde el pinch hasta el corte, proponiendo una escala BBCH general para este cultivo comercial.

3.1.2 Materiales y Métodos

Esta investigación se realizó mediante un muestreo continuo desde el despunte hasta el final de la cosecha en tres variedades de clavel, en las cuales se determinó el tiempo transcurrido desde el despunte hasta el final de la cosecha, midiendo para cada variedad la duración de las etapas vegetativa y reproductiva.

Ubicación: La investigación se realizó en la finca Flores La Mana SAS, ubicada en el municipio de Tocancipá (Cundinamarca, Colombia), vereda El Porvenir, a 4°59' N y 73°55' W. La zona presenta una altitud de 2.605 msnm, precipitación media anual de 857 mm, temperatura externa media anual de 14,1°C y 80% de humedad relativa externa; dentro de los invernaderos se presenta una temperatura media anual de 19 °C y una humedad relativa promedio de 77%.

Material vegetal: Se evaluaron tres variedades de clavel. La variedad Diletta con flor de color amarillo, cuyo hibridado es Selecta, la variedad Mizuky de color rosado, cuyo hibridado es Breier y la variedad Zafiro de color morado, cuyo hibridado es SB Talee. Estas variedades presentan longitud de tallo entre 80 y 110 cm y una vida en florero entre 12 a 15 días. Las variedades fueron seleccionadas por presentar las mismas características de manejo agronómico.

Siembra: La siembra de las tres variedades estudiadas se llevó a cabo el día 14 de marzo de 2018. Para cada variedad se sembraron 20 camas hidropónicas de dimensiones de 30 m x 1 m, utilizando una densidad de siembra de 29,6 plantas/m², con una distancia de 0,12 m entre plantas y 0,13 m entre filas. El esqueje que se

utilizó para la siembra se retiró del cuarto frío 24 h antes de la siembra para su climatización. Todo el esqueje sembrado presentó entre 6 y 8 pares de hojas verdaderas.

Con el fin de disminuir la posible pérdida de plantas en campo, se revisaron los esquejes en su totalidad descartando aquellos que no cumplieron las exigencias de calidad como lo es baja raíz, esqueje torcido, daño mecánico, esqueje alargado, punta de hojas quemadas, base rajada y problemas fitosanitarios como *Fusarium roseum*, *Botrytis* sp., bases amarillas y *Cladosporium* sp.

Pinch: A los 55 días después de siembra se realizó el despunte con el fin de estimular la brotación lateral de la planta, retirando la punta del tallo por encima del octavo nudo de la hoja.

Manejo: Se mantuvo un manejo agronómico convencional de las plantas durante el desarrollo del trabajo, con aplicaciones de productos para el control fitosanitario de acuerdo con el monitoreo. Las labores culturales de rutina, los empioles, encanastes, desbotones y cosecha de tallos, se realizaron de acuerdo con los estadios fenológicos del cultivo.

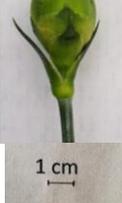
Muestreo: Después del despunte se seleccionaron tres camas por cada variedad. En cada cama seleccionada se tomaron 50 plantas aleatoriamente sin tener en cuenta las plantas del inicio y del final de la cama; de cada planta se seleccionó un brote del quinto nudo como unidad de muestro. La unidad experimental la constituyó cada planta, obteniéndose 150 unidades experimentales por variedad. Los tallos seleccionados fueron monitoreados cada siete días en la etapa vegetativa y reproductiva, para el momento donde los tallos iniciaban su cosecha se monitorearon cada dos días. Se registraron datos de crecimiento y desarrollo en cada una de las etapas, para así poder determinar el periodo de duración en días de cada una de ellas.

Desarrollo de la escala de fenología BBCH: Se realizó una observación del ciclo de desarrollo desde la siembra hasta la cosecha del clavel en las tres variedades determinando los estados principales de desarrollo que se presentan a lo largo del

ciclo, para asignar posteriormente el código decimal a cada fase. El cambio de estado se consideró en el momento en el cual el 70% de los tallos evaluados presentaban una fase determinada.

Determinación de las dos etapas fenológicas: El crecimiento de las plantas en un cultivo comercial fue dividido en dos etapas fenológicas generales para las tres variedades estudiadas; para cada etapa se tomaron distintas medidas según el estado de desarrollo en el que se encontrara el tallo. La primera etapa es la vegetativa, esta inicia desde el momento del despunte y finaliza cuando se observa la formación del botón floral; en esta etapa se registró la altura de la planta y el número de nudos presentes. La segunda etapa es la reproductiva, la cual inicia en el momento de la aparición del botón floral visible, es decir el momento en el que el domo apical se diferencia del vegetativo, hasta el momento que la flor se abra mostrando los pétalos y estos cumplan las características necesarias para el corte; para la etapa reproductiva se determinaron siete fases fenológicas que describen el estado del botón floral en el clavel estándar según el diámetro y forma del botón floral, hasta conseguir la madurez para ser cosechado comercialmente (Tabla 1).

Tabla 1. Estadios de desarrollo del botón principal de clavel estándar que se tuvieron en cuenta para la etapa reproductiva para las tres variedades de clavel

Fase fenológica	Abreviatura	Descripción	Foto
Arroz	AZ	El botón floral presenta un diámetro entre 3,7 a 3,9 mm	
Arveja	AV	El botón floral presenta un diámetro entre 4,0 a 6,9 mm	
Garbanzo	G	El botón floral presenta un diámetro de 7,0 a 10,9 mm	
Bola	B	El botón floral presenta un diámetro de 14,0 a 17,9 mm	
Barril	BR	El botón floral se hincha presentando un diámetro de 18 mm o más	
Punto Estrella	PE	Se da cuando el botón floral abierto, visto desde arriba denota la forma de una estrella.	
Corte	CT	Apertura de 20° a 25°	

Teniendo en cuenta que comercialmente el corte de clavel presenta diferentes aperturas para la última etapa de la fase reproductiva de corte, se realizó una descripción en las diferentes aperturas de botón floral, teniendo en cuenta la posición de los pétalos externos con relación a la parte superior del cáliz, diferenciando así cuatro grados de apertura (Tabla 2).

Tabla 2. Aperturas comerciales de corte del botón principal de clavel estándar que se tuvieron en cuenta para la etapa reproductiva de corte.

Fase fenológica	Abreviatura	Descripción	Foto
Marítimo	MR	Apertura de 20° a 25°	
Pétalo Recto	PR	Apertura de 25° a 35	
Europa	EU	Apertura de 35° a 55 °	
Miami	MI	Apertura mayor a 55°	

Descripción de la escala BBCH para clavel

El ciclo completo de desarrollo de las plantas se subdivide en diez fases fenológicas principales de desarrollo visiblemente notables. Estos estadios principales de crecimiento se describen usando números del 0 al 9 en orden ascendente, desde la germinación

hasta la senescencia; con base en estas características y observando el crecimiento del clavel, se determinó una escala BBCH general para el cultivo comercial, de acuerdo con Hack *et al.* (1992) (Tabla 3). Es importante tener en cuenta que cada variedad posee características propias de productividad y precocidad, color, tamaño de cabeza, número de pétalos y/o bordes lisos o cerrillados de sus pétalos; sin embargo, todas mantienen patrones de crecimiento similares, todas presentan ciertas fases de desarrollo, si son manejadas de la misma manera y comparten condiciones climáticas y geográficas similares (Pizano de Márquez, 2000).

Tabla 3. Descripción de las etapas fenológicas de clavel (*Dianthus caryophyllus* L.), utilizadas comercialmente

Código BBCH	Descripción
Estadio principal de desarrollo 1: Desarrollo de las hojas en el tallo principal antes del pinch	
14	Cuarto par de hojas
15	Quinto par de hojas
16	Sexto par de hojas
17	Séptimo par de hojas
18	Octavo par de hojas
19	Noveno o más pares de hojas
Estadio principal de desarrollo 2: Formación de brotes laterales	
21	Primer brote lateral visible
22	Segundo brote lateral visible
23	Tercer brote lateral visible
24	Cuarto brote lateral visible
25	Quinto brote lateral visible
26	Sexto brote lateral visible
27	Séptimo brote lateral visible
Estadio principal de desarrollo 3: Elongación de brotes (después del pinch)	
30	Brote lateral visible con 2 pares de hojas juntas
31	Un entrenudo, alargamiento visible, el tallo alcanza el 20 % del crecimiento final
32	Dos entrenudos, alargamiento visible, el tallo alcanza el 30 % del crecimiento final
33	Tres entrenudos, alargamiento visible, el tallo alcanza el 40 % del crecimiento final

Código BBCH	Descripción
34	Cuatro entrenudos, alargamiento visible, el tallo alcanza el 50 % del crecimiento final
35	Cinco entrenudos, alargamiento visible, el tallo alcanza el 60 % del crecimiento final
36	Seis entrenudos, alargamiento visible, el tallo alcanza el 70 % del crecimiento final
37	Siete entrenudos, alargamiento visible, el tallo alcanza el 80 % del crecimiento final
38	Ocho entrenudos, alargamiento visible, el tallo alcanza el 90 % del crecimiento final
39	Nueve o más entrenudos, alargamiento visible, el tallo alcanza el 100 % del crecimiento final
Estadio principal de desarrollo 5: Formación del botón floral visible	
50	Botón floral no es visible
51	Botón floral visible en las hojas axilares más jóvenes, aparición del 10 % del tamaño final de la estructura de la flor
52	Botón floral presenta un diámetro entre 3,7 a 3,9 mm, empieza a separarse del último par de hojas, aparición del 20 % del tamaño final de la estructura de la flor
53	Botón floral presenta un diámetro entre 4,0 a 5,0 mm, empieza a separarse del último par de hojas, aparición del 30 % del tamaño final de la estructura de la flor
54	Botón floral presenta un diámetro entre 5,1 y 6,9 mm, se genera cuando el botón floral se ovala, continúa separándose del último par de hojas, aparición del 40 % del tamaño final de la estructura de la flor
55	El botón floral presenta un diámetro de 7,0 mm a 10,0 mm, se caracteriza porque el ápice del botón floral empieza a alargarse, finaliza la separación con el último par de hojas, aparición del 50 % del tamaño final de la estructura de la flor
56	El botón floral presenta un diámetro de 11,0 a 13,9 mm, se caracteriza porque el ápice del botón floral empieza a alargarse, aparición del 60 % del tamaño final de la estructura de la flor
57	El botón floral presenta un diámetro de 14,0 a 16,9 mm, se caracteriza porque el ápice del botón termina de alargarse, finaliza la separación con el último par de hojas, aparición del 70 % del tamaño final de la estructura de la flor

Código BBCH	Descripción
58	El botón floral presenta un diámetro de 17,0 a 17,9 mm, se caracteriza porque inicia el hinchamiento del botón, sin que se presente la separación de los sépalos, aparición del 90 % del tamaño final de la estructura de la flor
59	El botón floral presenta un diámetro de 18,0 mm o más, se finaliza el hinchamiento del botón, se presente la separación de los sépalos mostrando el color de los pétalos, aparición del 100% del tamaño final de la estructura de la flor
Estadio principal de desarrollo 6: Floración hasta el corte	
61	Inicio de la floración, los sépalos comienzan a desprenderse mostrando el color de los pétalos
62	El ápice del botón floral se abre mostrando los pétalos aún cerrados
63	El botón floral abierto, visto desde arriba muestra una estrella
64	El botón floral abierto en su totalidad, pétalos totalmente expuestos y separados en un 50%
65	Pétalos rectos, totalmente separados
66	Pétalos rectos, con una apertura de 25°, respecto al centro del botón floral
67	Pétalos rectos, con una apertura de 40°, respecto al centro del botón floral
68	Pétalos rectos, con una apertura de 60°, respecto al centro del botón floral
69	Fin de la floración, pétalos rectos con una apertura de 80°, respecto al centro del botón floral, sobresalen los estigmas de la flor por encima de los pétalos

Fuente: Elaboración propia

Fisiológicamente, el clavel es una planta perenne adaptada a condiciones de cultivo bianual, que crece entre 80 a 100 cm, sus brotes laterales son herbáceos y pueden presentarse alrededor de diez brotes por planta, los cuales crecen de manera lineal en las hojas opuestas que crecen desde la base (DHA, 2006). Para la adaptación de la escala BBCH para clavel, no se utilizaron las descripciones para el estado de desarrollo 0 (germinación, brotación y desarrollo de la yema), 4 (desarrollo de las partes vegetativas cosechables de la planta), 7 (desarrollo del fruto), 8 (coloración o maduración de frutas y semillas) y 9 (senescencia). Estas descripciones no se emplearon ya que esas fases de

desarrollo no están presentes en el ciclo de crecimiento de clavel dentro de un sistema de producción como flor de corte para exportación.

La fase de desarrollo 0 se excluye debido a la forma de reproducción que la planta presenta, la cual corresponde a propagación asexual con esquejes que provienen de plantas madre, de donde se toma el material vegetal para la propagación (Hilverda Kooij, 2010). Las variedades comerciales utilizadas provienen de un grupo de clones seleccionados, los cuales se encuentran libres de virus y enfermedades; este material es llevado a la propagación para ser multiplicado (Pizano de Márquez, 2000). Adicionalmente, teniendo en cuenta que en el clavel estándar, al ser una planta perenne presenta una floración continua después del primer pico de producción, se cultiva principalmente como flor de corte, se puede excluir las fases de desarrollo cuatro, siete, ocho y nueve, ya que estas no encajan dentro de la producción comercial del clavel; adicionalmente, Dona *et al.* (2017) afirmaron que la planta de clavel de forma comercial tiene un potencial de producir 10 - 20 flores por año y cada nuevo tallo que florece se origina del corte de una flor o un nuevo brote que emerge de la base de la planta, y estas nuevas flores de nuevo serán cortadas, por lo cual la planta no tiene la oportunidad de desarrollar ninguna parte vegetativa cosechable y por ende, no se presenta ningún desarrollo del fruto que madure y posteriormente muera.

Estadio principal de desarrollo 1: Desarrollo de las hojas en el tallo principal. Una vez sembrado el esqueje, el crecimiento de la planta está determinado por las características genéticas de la planta madre; no obstante, su capacidad vegetativa puede depender de la forma como haya sido cosechado lo que influye los hábitos del crecimiento del clavel, ya que un buen esqueje forma raíces abundantes que logra un buen anclaje al sustrato y así mismo una mejor absorción de nutrientes (Pizano de Márquez, 2000).

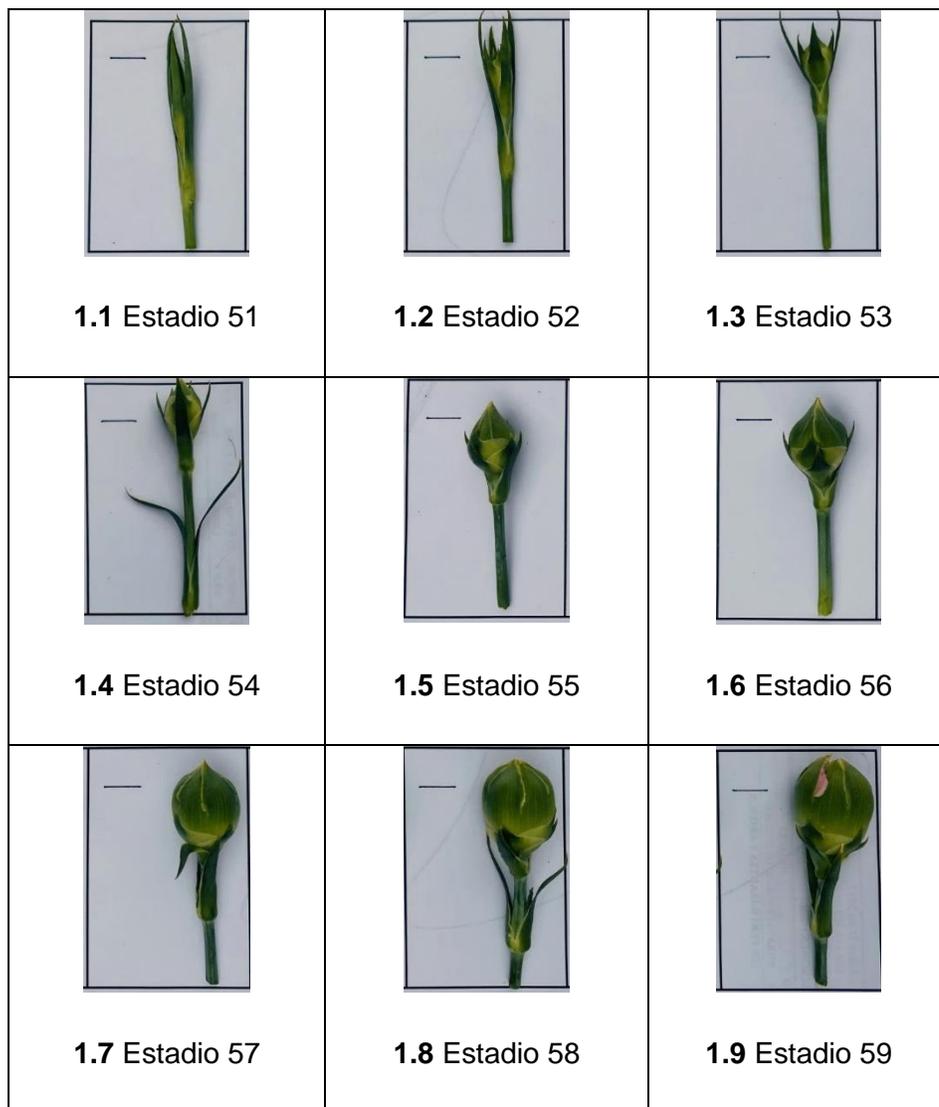
Estadio principal de desarrollo 2: Formación de brotes laterales. Pizano de Márquez (2000) afirma que normalmente un esqueje desarrollado en condiciones normales de luminosidad llega a contar con 17 a 21 pares de hojas en promedio desde la base hasta el botón floral apical. De los 8 a 10 primeros pares de hojas ubicados en la base son aquellos con un mayor potencial vegetativo, es decir, son aquellos que presentan un

desarrollo de brotes que dan origen a las flores de longitud y calidad deseables para fines comerciales.

Estadio principal de desarrollo 3: Elongación de brotes productivos (después del Pinch). Holley y Wagner (1962) afirman que con el despunte sencillo se elimina la dominancia apical del tallo y consigue una estimulación temprana y más uniforme de los cogollos vegetativos para la futura floración; esto concuerda con lo reportado por Martínez y González (1983), quienes confirman que el crecimiento de las yemas laterales en el clavel ocurre después de la remoción del meristemo apical. Como resultado de este despunte se presenta un incremento de la longitud de la yema, así como un incremento de la división celular, y estos cambios pueden ser inducidos en plantas sin despuntar bajo ciertas circunstancias con giberelinas. Lo anterior concuerda con Pizano de Márquez (2000), quien afirma que desde el momento de la siembra el esqueje presenta una marcada dominancia apical que rápidamente forma tallos reproductivos, que conlleva a la necesidad de un despunte, evitando así un gasto energético que comercialmente es inútil; posteriormente pasa al desarrollo de brotes laterales y un periodo de desarrollo vegetativo; una vez la planta comienza el desarrollo y crecimiento de los brotes laterales, inicia un periodo reproductivo con elongación de tallos y formación del botón floral.

Estadio principal de desarrollo 5: Formación del botón floral visible. Al terminar el desarrollo vegetativo, los meristemos apicales cesan de producir hojas y comienzan a producir las partes florales; los claveles presentan una inflorescencia cimosa, es decir, esta inflorescencia está formada por un número predeterminado de flores, sin yemas activas y por lo tanto pueden ser cultivados como clavel estándar o como clavel spray; los primeros son producidos por la remoción de las yemas axilares, así que hay formación de una única flor por tallo; el segundo es producido por la remoción de la yema apical, por lo cual hay desarrollo de las yemas axilares (Larson, 1992). Posteriormente inicia el desarrollo visual del botón floral (figura 1).

Figura 1. Estadio principal de desarrollo 5 (según BBCH), formación del órgano floral (elaboración propia)



Como se muestra en la figura 1.1 (estadio 51), el botón floral apenas es visible a simple vista ya que está cubierto por las hojas axilares más jóvenes, en la figura 1.2 el botón floral ya presenta un crecimiento del 20% de su tamaño final y, sin embargo, gran parte de este sigue siendo cubierto por las hojas axilares. En la figura 1.3 se observa un botón floral con una forma alargada, posteriormente el botón floral comienza a hincharse semejando una forma oval (Figura 1.4). A medida que el botón floral sigue su desarrollo, el ápice floral empieza a elongarse dando una forma más alargada (Figura 1.5), rápidamente el botón floral empieza a hincharse dando una apariencia más redonda y el ápice del botón floral empieza a elongarse (Figura 1.6).

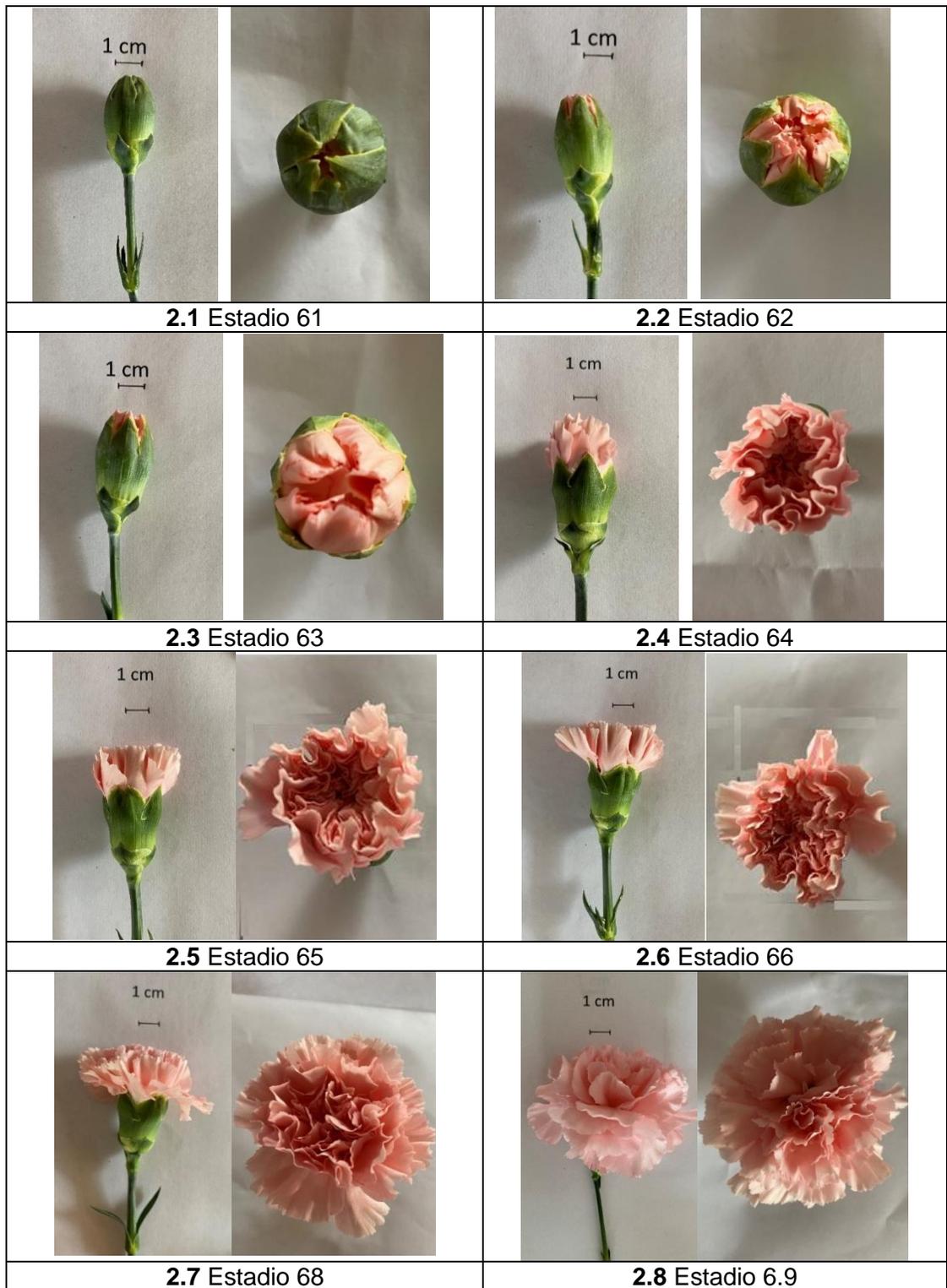
El botón termina su elongación y finaliza con la separación del último par de hojas axilares (Figura 1.7); el botón floral continúa hinchándose, sin que se presente la separación de los sépalos alcanzando aproximadamente 1,8 cm (Figura 1.8). Finalmente, el botón floral completa el 100% de su formación cuando se visualiza el color de los pétalos (Figura 1.9).

Estadio principal de desarrollo 6: Floración. De acuerdo con Bilbao y Castro (1996) y Figueredo (2014) se observa en la figura 2 que, una vez terminado el proceso de formación del órgano floral, el ápice del botón floral se empieza a abrir e inicia a mostrarse el color de los pétalos de la nueva flor (Figura 2.1). Posteriormente, el botón floral continúa con la separación de los sépalos, por lo cual al ser visto desde la parte superior asemeja una estrella y en su interior se han diferenciado los estigmas, pero son demasiado pequeños y rectos; el ovario es unilocular (Figura 2.2).

Una vez el botón floral se ha abierto en su totalidad, los pétalos se exponen completamente, presentan el color de la variedad y estos se encuentran separados en un 50% (Figura 2.3), los pétalos siguen en el proceso de separación hasta llegar al 100%. Al observar desde la parte superior de la flor, el centro de esta es definido y sin ningún pétalo junto (Figura 2.4). Una vez los pétalos están totalmente expuestos continúan con su apertura e inicia su separación (Figura 2.5); cuando estos presenten una apertura de 25°, el color que exhibe es el característico de la variedad (Figura 2.6).

Cuando los pétalos se encuentran con una apertura de 60°, el ápice de los estigmas empieza a sobresalir y estos comienzan a curvarse hacia afuera, el color de estos depende de la variedad; en este momento ocurre la antesis, debido a que el clavel manifiesta protandria, que consiste en la maduración de las anteras antes que la de los estigmas, impidiendo que la flor se auto-polinice (Figura 2.7). Finalmente, los pétalos inferiores se encuentran paralelos al suelo con una apertura superior a 80°, los estigmas se observan completamente curvos hacia afuera, su aspecto es brillante y translucido (Figura 2.8).

Figura 2: Estadio principal de desarrollo 6 (según BBCH), Floración hasta el corte (elaboración propia)



Duración de las etapas fenológicas en días

En cada variedad estudiada se determinó el desarrollo de las dos etapas fenológicas desde el despunte hasta la cosecha. La tabla 4 muestra el comportamiento general de cada etapa fenológica por variedad. Al comparar el comportamiento de crecimiento y desarrollo de las tres variedades evaluadas, se puede determinar que la variedad Diletta es la más precoz, completando su ciclo de vida a los 220 días, mientras que las variedades Mizuky y Zafiro completan su ciclo de vida en 242 y 240 días, respectivamente, aproximadamente 34 semanas de vida después de la siembra.

Tabla 4. Duración de las etapas fenológicas en clavel por variedad desde la siembra hasta el final de cosecha

Duración de las etapas fenológicas				
Variedad	A pinch	Vegetativa	Reproductiva	Ciclo de vida
Diletta	55 días	69 días	96 días	220 días
Mizuky	55 días	71 días	116 días	242 días
Zafiro	55 días	85 días	100 días	240 días

Adicionalmente, no solo se observan diferencias en cuanto al tiempo de ciclo de vida, también se presentan en el tiempo de cada fase a pesar de que todas las variedades fueron pinchadas con el mismo tiempo e iniciaron su desarrollo vegetativo el mismo día; las variedades Mizuky y Diletta presentaron un menor tiempo de la etapa vegetativa, con 71 y 69 días respectivamente, aproximadamente 18 semanas desde la siembra hasta el fin de la etapa vegetativa, mientras que la variedad Zafiro se demoró dos semanas más, con 85 días. Para la etapa reproductiva las variedades Diletta y Zafiro se comportan de manera similar con 96 y 100 días, respectivamente, sin embargo, en esta etapa la variedad Mizuky presenta un mayor tiempo en días que las otras dos variedades, con dos semanas más que estas, con 116 días desde el fin de la etapa vegetativa al inicio de la etapa de corte. Las variedades estudiadas Mizuky y Zafiro completaron aproximadamente 34 semanas desde la siembra hasta el fin de la fase reproductiva, mientras que la variedad Diletta completo aproximadamente 31 semanas.

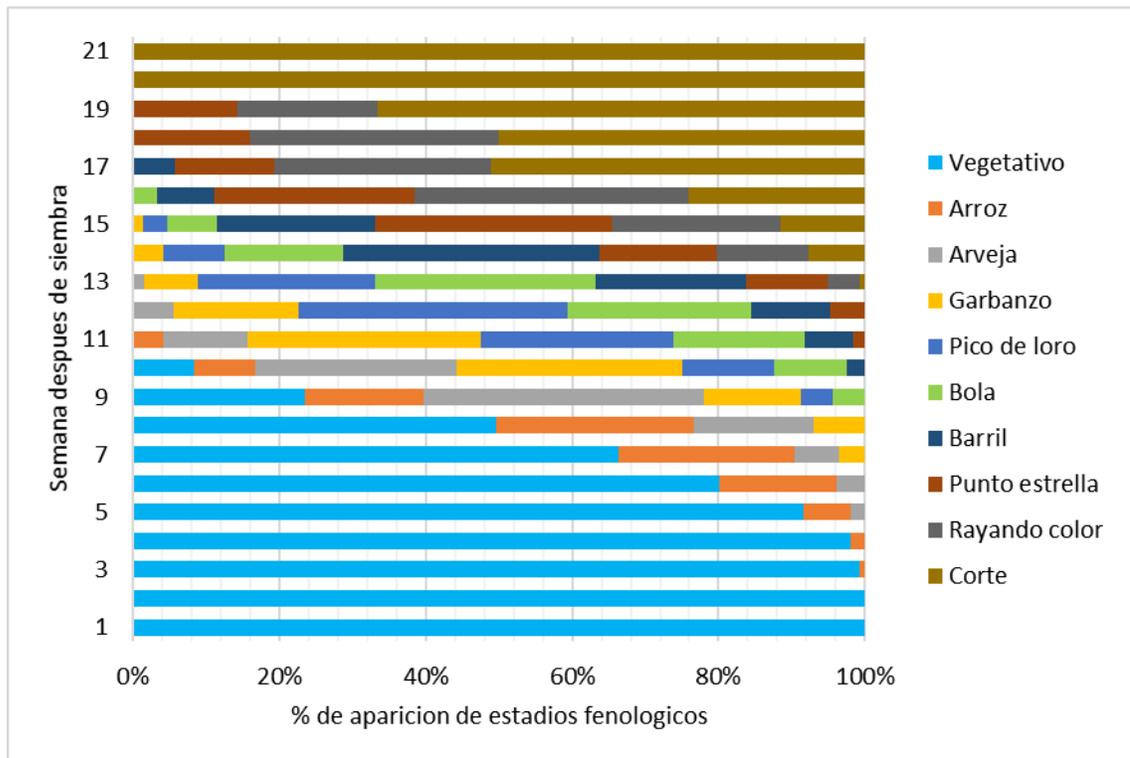
Los resultados obtenidos en las tres variedades en cuanto al tiempo en días de cada una de las etapas son muy similares a los encontrados por Baracaldo *et al.* (2010), quienes describen el desarrollo del clavel en cinco etapas hasta el final de la primera cosecha. Estos autores describen una primera etapa que consiste en la fijación de la raíz después del trasplante, la cual ocurre entre las semanas 0 y 6; la segunda etapa es el desarrollo de brotes laterales después del despunte, que ocurre entre las semanas 5 y 15 aproximadamente; la tercera es la elongación de tallos que ocurre entre las semanas 14 y 25; estas tres etapas pueden ser agrupadas en una sola y compararse con la etapa vegetativa. A pesar que el tiempo del pinch difiera en dos semanas, el tiempo que transcurre entre la siembra y el fin de la etapa vegetativa concuerda con el tiempo que se presentó en las variedades estudiadas, los cuales están entre las semanas 18 y 20. La cuarta etapa descrita por los autores son el desarrollo del botón principal y los laterales entre las semanas 16 y 30, que concuerda con la descripción y el tiempo de la etapa productiva de las variedades de este estudio, ya que las tres variedades cumplen esta etapa entre las semanas 29 y 30. Finalmente, la quinta y última etapa es la primera cosecha, la cual ocurre entre las semanas 23 y 34, las cuales concuerdan con los tiempos de corte de cada una de las variedades de este estudio y su respectivo fin de primer pico. Las etapas presentadas por Baracaldo *et al.* (2010) pueden ser agrupadas en las dos etapas definidas en este trabajo, agrupando las tres primeras etapas en una sola.

Desarrollo fenológico para variedad Diletta

En la figura 3 se aprecia el comportamiento de la aparición de los estadios fenológicos para la variedad Diletta. En la semana 12 después de siembra aparecen los primeros tallos reproductivos y para la semana 19 después de siembra el 100% de los tallos ya son reproductivos. Al detallar la aparición de cada fase fenológica en el desarrollo de la flor, se observa que el cambio de cada fase fenológica se presenta con un tiempo aproximado de siete días, donde el estadio fenológico Arroz se concentra en la semana 16 después de siembra. Los estadios Arveja, Garbanzo, Pico de loro, Bola, Barril, Punto Estrella y Rallando color se concentraron en las semanas 18, 19, 20, 21, 22, 23 y 24 después de siembra respectivamente. En la semana 22 después de siembra se presentaron los primeros tallos para corte, y para la semana 28 después de siembra el 100 % de los tallos fueron cortados; la cosecha se presentó en siete semanas

aproximadamente, donde el pico de cosecha se encuentra entre las semanas 24 y 25 después de siembra.

Figura 3. Semana de aparición de los estadios fenológicos reproductivos para el clavel variedad Diletta.



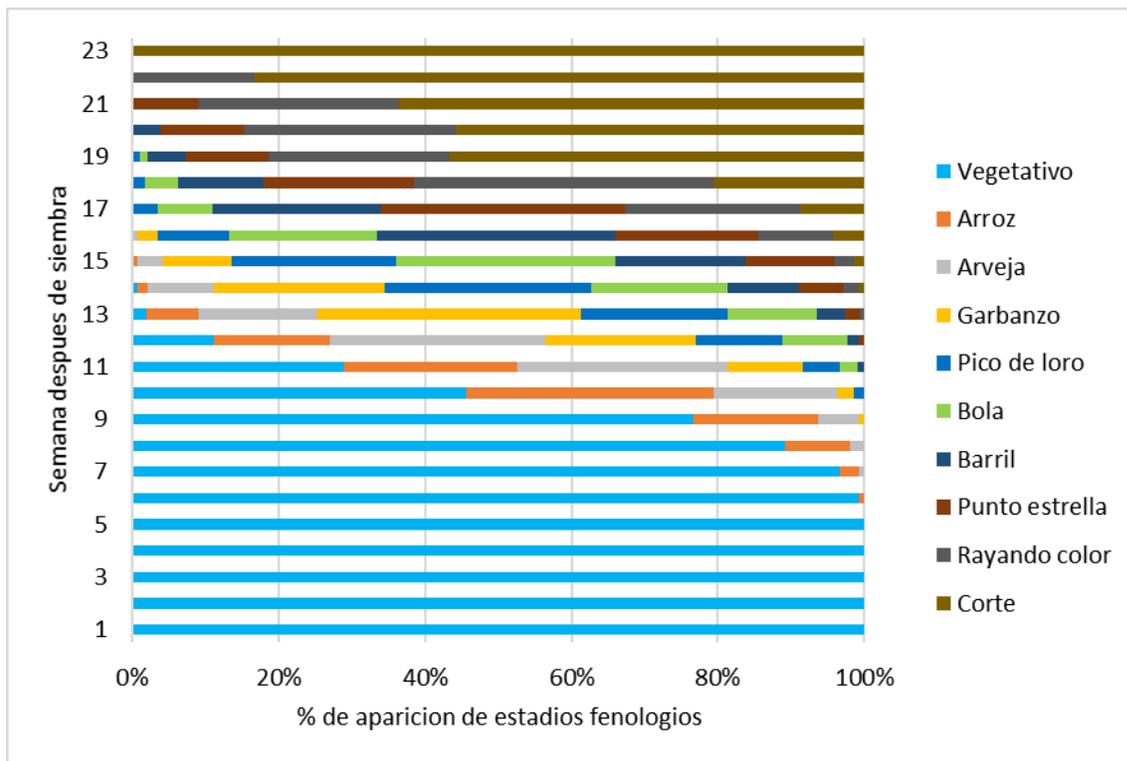
Desarrollo fenológico para variedad Mizuky

En la figura 4 se puede ver el comportamiento de la aparición de los estadios fenológicos para la variedad Mizuky. En la semana 15 después de siembra aparecen los primeros tallos reproductivos y para la semana 23 después de siembra el 100% de los tallos ya son reproductivos. Al detallar la aparición de cada fase fenológica en el desarrollo de la flor, se observa que el cambio de cada fase fenológica se presenta con un tiempo aproximado de 7 días, donde el estadio fenológico Arroz se concentra en la semana 19 después de siembra, los estadios Arveja, Garbanzo, Pico de loro, Bola, Barril, Punto Estrella y Rallando color se concentraron en las semanas 20, 21, 22, 23, 24, 25 y 28 después de siembra respectivamente. En la semana 24 después de siembra se observan los primeros tallos para corte, y para la semana 31 después de siembra el 100 % de los

tallos fueron cortados; la cosecha se presentó en nueve semanas aproximadamente, donde el pico de cosecha se encuentra entre las semanas 27 y 28 después de siembra.

Al comparar con la variedad Diletta, se observa que la variedad Misuky presenta un ciclo mayor de aproximadamente tres semanas.

Figura 4. Semana de aparición de los estadios fenológicos reproductivos para el clavel variedad Mizuky.



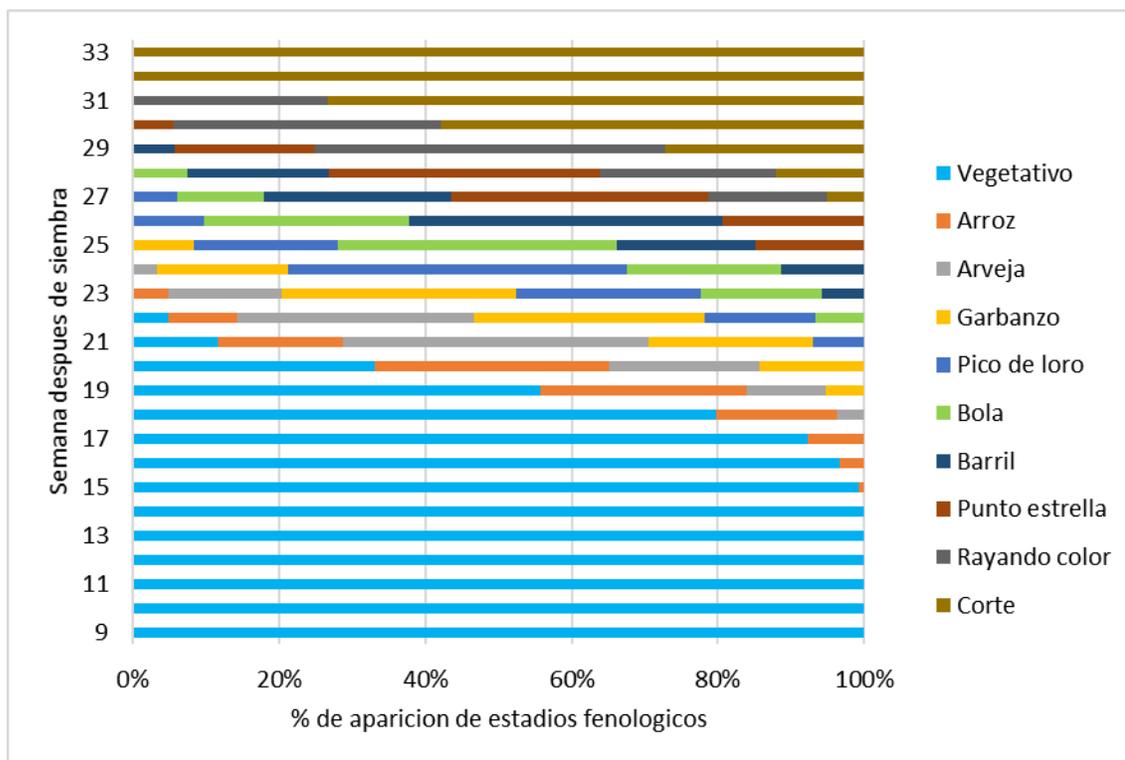
Desarrollo fenológico para variedad Zafiro

En la figura 5 se aprecia el comportamiento de la aparición de los estados fenológicos para la variedad Zafiro. En la semana 16 después de siembra aparecen los primeros tallos reproductivos y para la semana 23 después de siembra el 100% de los tallos ya son reproductivos. Al detallar la aparición de cada fase fenológica en el desarrollo de la flor, se observa que el cambio de cada fase fenológica se presenta con un tiempo aproximado de 7 días a excepción de las fases fenológica arroz y pico de loro, donde la fase fenológica arroz se concentra en la semana 20 después de siembra, los estadios Arveja, Garbanzo, Pico de loro, Bola, Barril, Punto Estrella y rallando color se

concentraron en las semanas 22, 23, 24, 26, 27, 28 y 29 después de siembra respectivamente. En la semana 27 después de siembra se presentaron los primeros tallos para corte, y para la semana 31 después de siembra el 100 % de los tallos fueron cortados; la cosecha se presentó en seis semanas aproximadamente, donde el pico de cosecha se encuentra entre las semanas 29 y 30 después de siembra.

El comparar esta variedad con las variedades Diletta y Mizuky, se observa que esta presenta un ciclo mayor que las dos anteriores de aproximadamente cinco semanas y dos semanas respectivamente.

Figura 5. Semana de aparición de los estadios fenológicos reproductivos para el clavel variedad Zafiro



3.1.3 Conclusiones y recomendaciones

Para las tres variedades de clavel se determinaron dos etapas fenológicas desde el despunte hasta el corte, la primera es la etapa vegetativa y la segunda la reproductiva, observándose que el comportamiento fenológico del clavel en las variedades Diletta,

Misuky y Zafiro es diferente entre ellas en cuanto al periodo de tiempo requerido para la obtención de la cosecha. La variedad Diletta es la más precoz de las tres (ciclo de vida: 220 días), mientras que las variedades Mizuky y Zafiro son similares (242 y 240 días respectivamente), por lo cual se recomienda realizar manejos diferentes a las tres variedades.

3.1.4 Bibliografía

Azkues, M. (2000). La fenología como la herramienta en la agroclimatología. Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias (Ceniap), Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Maracay.

Baracaldo, A. y Florez, V. (2010). Tasas e índices de crecimiento a segundo pico de cosecha en clavel estándar cv. Nelson cultivado en suelo y en sustratos. *Agronomía Colombiana*, 28(2): 209-217.

Bilbao, O. y Castro, C. (1996). Estudios preliminares para la obtención de semilla híbrida de clavel estándar (*Dianthus caryophyllus*) bajo las condiciones de la sabana de Bogotá. Trabajo de grado, Facultad de Agronomía. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

Castellanos, O., Fonseca, S., y Buriticá, S. (2010). Agenda prospectiva de investigación y desarrollo tecnológico para la cadena productiva de flores y follajes en Colombia con énfasis en clavel. Giro Editores Ltda.; Bogotá, Colombia

Castilla, Y., González, M., y Lara, R. (2014). Determinación de estabilidad genética en vitroplantas de clavel español (*Dianthus caryophyllus* L.), micropropagadas con Biobras-16. *Cultivos Trop.* 35: 7-74.

Dona, A., Fatmi, M., Singh, D., y Benny C. (2017). Evaluation of carnation (*Dianthus Caryophyllus* L.) Varieties under naturally ventilated polyhouse. *Plant Archives*, 17(2): 1262-1266.

Department of Health & Ageing (DHA). (2006). The biology and ecology of *Dianthus caryophyllus* L. (Carnation). Department of Health and Ageing, Office of the Gene Technology Regulator, Canberra, Australia.

Figueredo, M. (2014). Evaluación del desarrollo y las características morfológicas de una línea F4 de clavel (*Dianthus caryophyllus*). Recuperado de: <http://hdl.handle.net/10654/12770>.

Fenner, M. (1998). The phenology of growth and reproduction in plants. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 1(1): 78-91.

- Hack H., Bleiholder, H., Buhr, L., Meier, U., Schnock-Fricke, U., Weber E., y Witzemberger, A. (1992).** Einheitliche Codierung der phanologischen Entwicklungsstadien mono- und dikotyler Pflanzen - Erweiterte BBCH-Skala, Allgemein. *Nachrichtenbl. Deut. Pflanzenschutzd.*, 44: 265-270.
- Hilverda Kooij. (2010).** Directivas de cultivo de claveles [internet]. Hilverda Kooij plant technology, Holanda. En: www.hilverdakooij.nl; consulta: 15 de Octubre, 2018.
- Hormaza, P., Forero, C., Ruiz, R., y Romero, H. (2010).** Fenología de la palma de aceite africana (*Elaeis guineensis* Jacq.) y del híbrido interespecífico (*Elaeis oleifera* x *Elaeis guineensis*). Cenipalma, Bogotá.
- Holley, W. D. y Wager, D. L. (1962).** Carnation timing from single pinch. *Colo. Flow. Grow. Asso. Bull.*, 146.
- Kochhar, S. L. y Gujral, S. K. (2020).** Plant physiology - Theory and applications. 2nd ed. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Lambers, H. y Oliveira, R.S. (2019).** Plant physiological ecology. 3rd ed. Springer Nature Switzerland, Cham, Suiza.
- Larson, R. (1992).** Introduction to floriculture. Editorial Academic Press, pp .45- 53, segunda edición; Carolina del Norte, Estados Unidos.
- Machado N., Regina, P., Gatti, A., y Mendes C., V. J. (2006).** Temperature effects on seed germination in races of common beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Acta Sci. Agron.*, 28: 155164.
- Martínez B. R. y González, M. E. (1983).** Comparación de dos tipos de poda a dos edades en cinco variedades de clavel estándar. *Agronomía Colombiana*, 1(1): 21-34.
- Meier, U. (2018),** Etapas de desarrollo de las plantas monocotiledóneas y dicotiledóneas BBCH Monografía, Instituto Julius Kühn, Quedlinburg (Alemania). Consultado en: <https://www.julius-kuehn.de/media/Veroeffentlichungen/bbch%20epaper%20span/page.pdf> fecha de consulta 11/02/2021
- Parra-Coronado, A., Fischer, G. y Chávez-Córdoba, B. (2015).** Tiempo térmico para estados fenológicos reproductivos de la feijoa (*Acca sellowiana* (O. Berg) Burret). *Acta Biológica Colombiana*, 20(1): 167-177. Doi: 10.15446/abc.v20n1.43390
- Pizano De Márquez, M. (2000).** Clavel *Dianthus caryophyllus*. Ed. Hortitecnia Ltda., Bogotá. pp. 15-19.
- Whealy, C. A. (1992).** Carnations. pp. 43-64. En: Larson, R. A. (Ed.), Introduction to Floriculture, second ed. Academic Press, San Diego.

3.2 Predicción de la duración de las etapas fenológicas en tres variedades de Clavel estándar (*Dianthus caryophyllus* L.) en términos de tiempo térmico

Resumen

Uno de los factores ambientales más influyentes en el proceso de desarrollo de las plantas es la temperatura que tiene un impacto significativo en el crecimiento y la producción de claveles. El objetivo de este estudio fue determinar la temperatura base para tres variedades de clavel evaluadas y con base en estas, determinando el tiempo térmico en grados día de crecimiento (GDD) para cada una de las etapas. Se realizó un muestreo continuo desde el despunte hasta el final de la cosecha en tres variedades de clavel, en 4 siembras en fechas diferentes, en las cuales se determinó el tiempo desde el despunte hasta el final de la cosecha. Se estimó la temperatura base para las etapas vegetativa y reproductiva, usando el método de mínimo coeficiente de variación de los GDD o donde la primera derivada del modelo de regresión cuadrático es igual a cero. Se estimó la duración de las tres etapas fenológicas en términos de GDD utilizando las temperaturas base estimada. Los resultados mostraron que la temperatura base y el tiempo térmico varía dependiendo del estado de desarrollo del cultivo. En términos generales, al estudiar las tres variedades se determinó que se requiere una media de 2580,7 GDD acumulados y 185 días desde la siembra hasta la cosecha de la flor.

Palabras Claves: Modelo fenológico, temperatura base, grados día de crecimiento.

Abstract

One of the most influential environmental factors in the plant development process is temperature which has a significant impact on the growth and production of carnations. The objective of this study was to determine the base temperature for three evaluated carnation varieties and based on these, determining the thermal time in growth degree days (GDD) for each of the stages. Continuous sampling was carried out from budding to the end of the harvest in three varieties of carnation, in 4 plantings on different dates, in which the time from budding to the end of the harvest was calculated. The base temperature was estimated for the vegetative and reproductive stages, using the method

of minimum coefficient of variation of the GDD or where the first derivative of the quadratic regression model is equal to zero. The duration of the three phenological stages was estimated in terms of GDD using the estimated base temperatures. The results show that the base temperature and thermal time vary depending on the development stage of the crop. In general terms, when studying the three varieties, it is estimated that an average of 2580,7 accumulated GDD and 185 days are required from sowing to harvesting the flower.

Keywords: phenological model, base temperature. degree days of growth.

3.2.1 Introducción

El crecimiento y el desarrollo de los cultivos además de su comportamiento y supervivencia, son determinados de manera fundamental por las características climáticas del lugar donde se asientan; la temperatura es uno de los parámetros ambientales más importantes que condicionan el desarrollo y la supervivencia de las plantas e incide significativamente en la fotosíntesis y la respiración, en la ruptura de la latencia de yemas y semillas (brotación y germinación), en la inducción floral de yemas, la maduración de frutos y la caída de las hojas (Bordón y Blasco, 2018).

Diversos estudios han confirmado que la temperatura, la radiación solar, la edad de la planta, las relaciones fuente-sumidero y las respuestas al fotoperiodo influyen en el desarrollo fenológico de las plantas (Salazar-Gutiérrez *et al.*, 2013).

Salazar (2006) define la fenología es el estudio periódico de los fenómenos biológicos o naturales, determinados por etapas que caracterizan la emergencia, transformación o rápida desaparición de los órganos de las plantas, separadas por dos etapas sucesivas. El desarrollo de órganos está controlado por la tasa de aparición de nudos y la tasa de desarrollo de hojas y frutos, que son funciones estacionales dependientes de la temperatura. El desarrollo de varios órganos se produce en respuesta al calor, al frío o a la alternancia del día y la noche. Cada planta tiene requerimientos de temperatura específicos antes de alcanzar una etapa fenológica particular (Sikder, 2009).

La combinación de la temperatura y el tiempo ha generado el denominado tiempo térmico (TT), conocido también como suma de calor, grados día o grados día de crecimiento; este concepto está definido como “la cantidad de grados día (GDD) necesarios para finalizar un determinado proceso de desarrollo o etapa fenológica” (Trudgill *et al.*, 2005; López *et al.*, 2010; Parra-Coronado *et al.*, 2015). Los grados día de crecimiento (GDD) son los índices más comúnmente utilizados para estimar el desarrollo del cultivo (Qadir *et al.*, 2006). El término “días de desarrollo” (o crecimiento) se puede definir como el número de días (en grados Celsius) por encima del umbral de temperatura requerido para que una planta complete una etapa, fase o ciclo fenológico. Este método es el mejor para describir el desarrollo porque es independiente del entorno y del año (Arnold, 1959; Salazar-Gutiérrez *et al.*, 2013).

La aplicación del concepto de grados día a las observaciones fenológicas ha sido de gran utilidad en la agricultura y ha sido aplicado en numerosos sistemas de producción de frutas y hortalizas; entre las múltiples aplicaciones de este parámetro se encuentran la programación de fechas de siembra o ciclos de cultivo, pronóstico de fechas de cosecha, pronóstico de rendimiento, determinación del desarrollo vegetal esperado en diferentes localidades, determinación del desarrollo esperado de diferentes genotipos, pronóstico de coeficientes de evapotranspiración de cultivos y pronóstico de aparición de plagas y enfermedades (Clay *et al.*, 2006; Perry *et al.*, 1986).

Salazar (2006) reitera que el requisito básico para determinar el tiempo de celo en grados día es la temperatura crítica o de referencia (T_b) por debajo de la cual cesa el desarrollo fenológico o cesan los procesos metabólicos en las plantas. Este límite inferior es importante porque determina el efecto de la temperatura en el crecimiento y desarrollo del organismo. Es importante tener en cuenta que, si la temperatura diaria promedio es de 1 grado por encima de T_b durante un período de 24 horas, se acumula 1 grado-día. (Parra-Coronado *et al.*, 2015; Wilson y Barnett, 1983). Existen varios métodos de cálculo de los grados día (Arnold, 1959). Sin embargo, la más común en el desarrollo de estudios fenológicos en agricultura es la suma de las diferencias entre la temperatura media y la temperatura base (T_b), donde la temperatura media se calcula como el promedio de las temperaturas mínimas y máximas diarias (McMaster y Wilhelm, 1997; Matzarakis *et al.*, 2007).

El objetivo de este estudio fue determinar la temperatura base para tres variedades de clavel estándar evaluadas y con base en estas, determinar el tiempo térmico en grados día de cada una de las etapas fenológicas presentes desde el pinch hasta la cosecha.

3.2.2 Materiales y métodos

Esta investigación se basó en un muestreo continuo desde el despunte hasta el final de la cosecha en tres variedades de clavel, en 4 siembras en fechas diferentes, en las cuales se determinó la temperatura base (Tb) para cada fase fenológica y con base en ellas se determinó el tiempo térmico obtenido desde el despunte hasta el final de la cosecha, expresado como la cantidad de grados días (GDD) acumulados para cada variedad en las etapas vegetativa y reproductiva.

Ubicación: La investigación se realizó en la finca Flores La Mana SAS, ubicada en el municipio de Tocancipá (Cundinamarca, Colombia), vereda La Fuente, a 4°59" N y 73°55" W, con una altitud de 2.605 msnm, precipitación media anual de 857 mm, temperatura media anual de 14,1 °C y 80% de humedad relativa.

Material vegetal: Se evaluaron tres variedades de clavel, *D. caryophyllus*. La variedad Diletta con flor de color amarillo, cuyo hibridado es Selecta, la variedad Mizuky de color rosado, cuyo hibridado es Breier y la variedad Zafiro de color morado, cuyo hibridado es SB Talee. Estas variedades presentan longitud de tallo entre 80 y 110 cm y una vida en florero entre 12 a 15 días. Las variedades fueron seleccionadas por presentar las mismas características de manejo agronómico.

Siembra: La siembra de las tres variedades estudiadas se llevó a cabo el día 14 de marzo de 2018. Para cada variedad se sembraron 20 camas hidropónicas de dimensiones de 30 m de largo por 1 m de ancho, utilizando una densidad de siembra de 29,6 plantas/m², con una distancia de 0,12 m entre plantas y 0,13 m entre filas. El sustrato utilizado está compuesto por 55% cascarilla cruda, 35% sustrato usado y 10% de compost.

El esqueje que se utilizó para la siembra se retiró del cuarto frío 24 horas antes de la siembra para su climatización. Todo el esqueje sembrado presentó entre 6 y 8 pares de

hojas verdaderas. Con el fin de disminuir la posible pérdida de plantas en campo, se revisaron los esquejes en su totalidad descartando aquellos que no cumplieron las exigencias de calidad como lo es baja raíz, esqueje torcido, daño mecánico, esqueje alargado, punta de hojas quemadas, base rajada y problemas fitosanitarios como *Fusarium roseum*, *Botrytis* sp., bases amarillas y *Cladosporium* sp.

Para cada variedad se sembraron 20 camas hidropónicas de dimensiones de 30 m de largo por 1 m de ancho, utilizando una densidad de siembra de 29,6 plantas m⁻², con una distancia 0,12 m entre plantas y 0,13 m entre filas. El esqueje que se utilizó para la siembra se retiró del cuarto frío 24 horas antes de la siembra para su climatización.

Todos los esquejes sembrados presentaron entre 6 y 8 pares de hojas verdaderas; con el fin de disminuir la posible pérdida de plantas en campo, se revisó los esquejes en su totalidad descartando aquellos que no cumplieron con las exigencias de calidad como lo es el presentar baja raíz, esqueje torcido, daño mecánico, esqueje alargado, punta de hojas quemadas, base rajada, bases amarillas y problemas fitosanitarios como *Fusarium roseum*, *Botrytis* sp. y *Cladosporium* sp.

Pinch: A los 55 días después de siembra se realizó el despunte con el fin de estimular la brotación lateral de la planta, retirando la punta del tallo por encima del octavo nudo de la hoja.

Manejo: Se mantuvo un manejo agronómico convencional de las plantas durante el desarrollo de la investigación, con aplicaciones de productos para el control fitosanitario de acuerdo con el monitoreo. Las labores culturales de rutina, los empioles, encanastes, desbotones y cosecha de tallos, se realizaron de acuerdo con los estadios fenológicos del cultivo.

Datos climáticos: Usando el software “WIGA”, se extrajeron los datos correspondientes a temperatura mínima, media y máxima en un rango de 15 min, de manera continua. Para el monitoreo de los invernaderos se usa un sensor instalado a 2 metros del suelo al lado del experimento, adicional con el objetivo de asegurar el valor que arroja el sensor se ubica un higrómetro en diferentes partes de la planta, valido así la información que arroja el sensor.

Estimación de las temperaturas base (Tb): Para la estimación de las Tb se utilizaron tres métodos estadísticos diferentes: la menor varianza en GDD, la menor desviación estándar en GDD y el menor coeficiente de variación en GDD utilizando un modelo de regresión cuadrático (Parra-Coronado et al., 2015). Con el fin de usar los métodos anteriores, se registró la duración en días de cada etapa fenológica para cada variedad de clavel y se realizó la sumatoria de las temperaturas medias diarias presentadas durante los periodos de estudio (4 siembras). A partir de una temperatura de 0°C, la cual se fue incrementando en 0,1°C hasta un valor de 12°C, se estimó el tiempo térmico (GDD) para cada una de estas temperaturas, utilizando la ecuación 1, para cada variedad de clavel y etapa fenológica, considerando las cuatro siembras realizadas.

Con la matriz generada de GDD se procedió a aplicar los métodos mencionados para la estimación de las temperaturas base (Tb). De los métodos utilizados, el que estimó las Tb de manera más lógica de acuerdo con la fisiología del clavel, fue el método de menor coeficiente de variación en GDD utilizando un modelo de regresión cuadrático, el cual consiste en calcular el coeficiente de variación (CV) de los GDD para cada temperatura desde 0 hasta 12°C, con los valores generados en la matriz de GDD. La Tb para cada etapa fenológica y variedad de clavel, corresponde a aquella temperatura para la cual se obtiene el mínimo CV aplicando un modelo de regresión cuadrático, o donde la primera derivada del modelo de regresión es igual a cero.

La ecuación cuadrática es de la forma $CV = A (Tb)^2 + B (Tb) + C$, donde CV es el coeficiente de variación, Tb es la temperatura base y A, B y C son parámetros de la ecuación, los cuales se determinan usando la herramienta Solver de Excel®. El Solver realiza un proceso iterativo no lineal, que hace un cálculo preliminar utilizando los valores asignados inicialmente a los coeficientes de la ecuación cuadrática y modifica estos valores hasta que encuentra la suma mínima de las desviaciones al cuadrado, presentadas entre los CV calculados por la ecuación y los CV calculados por estadística. Posteriormente, derivando la ecuación obtenida e igualando la derivada a cero, se obtiene el valor correspondiente a Tb. Con el fin de determinar si existen diferencias entre las Tb de las diferentes fases fenológicas, se utilizó una prueba de t de Student para dos muestras suponiendo varianzas desiguales haciendo comparaciones entre las variedades.

Estimación del tiempo térmico (GDD): Para determinar el tiempo de cada fase en términos de grados-día de desarrollo (GDD) se utilizaron los valores de T_b preestimados para cada una de las tres variedades en cada etapa de desarrollo considerada. Esto se calculó utilizando la suma diaria de la diferencia entre la temperatura media de cada fase y la temperatura de referencia (T_b). (Ecuación 1).

$$TT = \sum_{t=1}^n T_i - n * T_b \quad (1)$$

En donde TT es el tiempo térmico expresado en grados días (GDD), n es el número de días, T_i la temperatura media diaria y T_b la temperatura base. Los GDDi para la estimación de TT se calculan teniendo en cuenta las siguientes indicaciones:

$$T_i = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \quad (2)$$

$$\text{Si } T_i > T_b, \text{GDDi} = T_i - T_b \quad (3)$$

$$\text{Si } T_i < T_b, \text{GDDi} = 0 \quad (4)$$

donde $T_{m\acute{a}x}$ y $T_{m\acute{i}n}$ corresponden a la temperatura máxima y mínima respectivamente, expresada en °C para el día i .

Para poder hacer el seguimiento del desarrollo del cultivo, es importante conocer la fecha de inicio de cada etapa fenológica, en cada variedad en cada siembra (Tabla 5)

Tabla 5. Fechas de inicio de las diferentes etapas fenológicas para tres variedades de clavel, en cada siembra

Fase	Número de siembra	Variedad		
		Mizuky	Zafiro	Diletta
Vegetativo	1	10/04/2018	10/04/2018	10/04/2018
	2	28/05/2018	28/05/2018	28/05/2018
	3	14/09/2018	14/09/2018	14/09/2018
	4	23/11/2018	23/11/2018	23/11/2018
Productivo	1	20/06/2018	04/07/2018	19/06/2018
	2	01/08/2018	16/08/2018	01/08/2018
	3	26/11/2018	30/11/2018	20/01/2019
	4	12/01/2019	01/02/2019	09/11/2018
Fin de ciclo	1	13/10/2018	11/10/2018	22/09/2018
	2	11/12/2018	18/11/2018	01/11/2018
	3	10/02/2019	01/03/2018	28/12/2018
	4	31/03/2019	25/04/2019	09/02/2019

Validación cruzada: Se realizó una validación cruzada para validar los resultados obtenidos del modelo de grados día con el fin de garantizar que estos son independientes. Se utilizó el método K folds, en este se realiza una división de los datos de forma aleatoria en 5 grupos de un tamaño similar; se usan 4 grupos para entrenar el modelo y uno de ellos se usa para validarlo, finalmente el proceso se repitió hasta 36 veces usando un grupo distinto como validación en cada iteración hasta llegar al resultado ideal donde la prueba se ajuste el máximo posible; al final se obtendrá un error cuadrático medio (RMSE) el cual cuantifica cuán diferente es un conjunto de valores. Cuanto más pequeño es un valor RMSE, más cercanos son los valores predichos y observados; para realizar esta validación se utilizó el programa estadístico Payton.

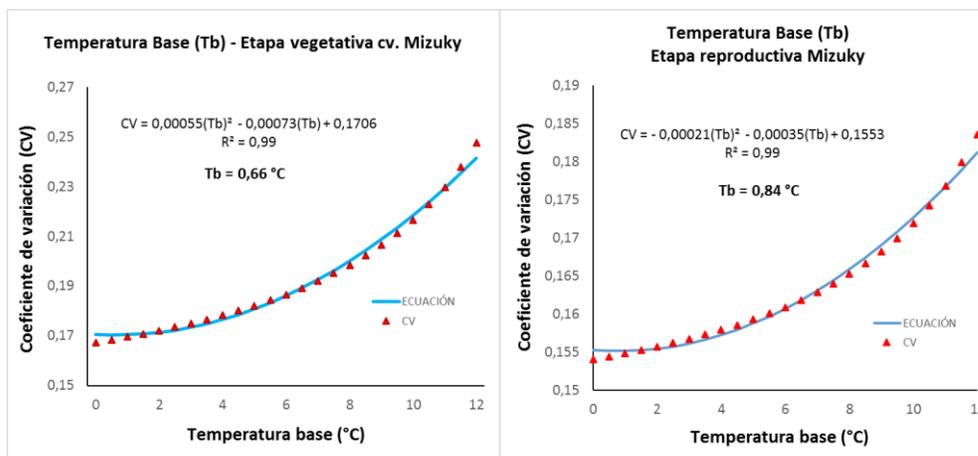
3.2.3 Resultados y discusión

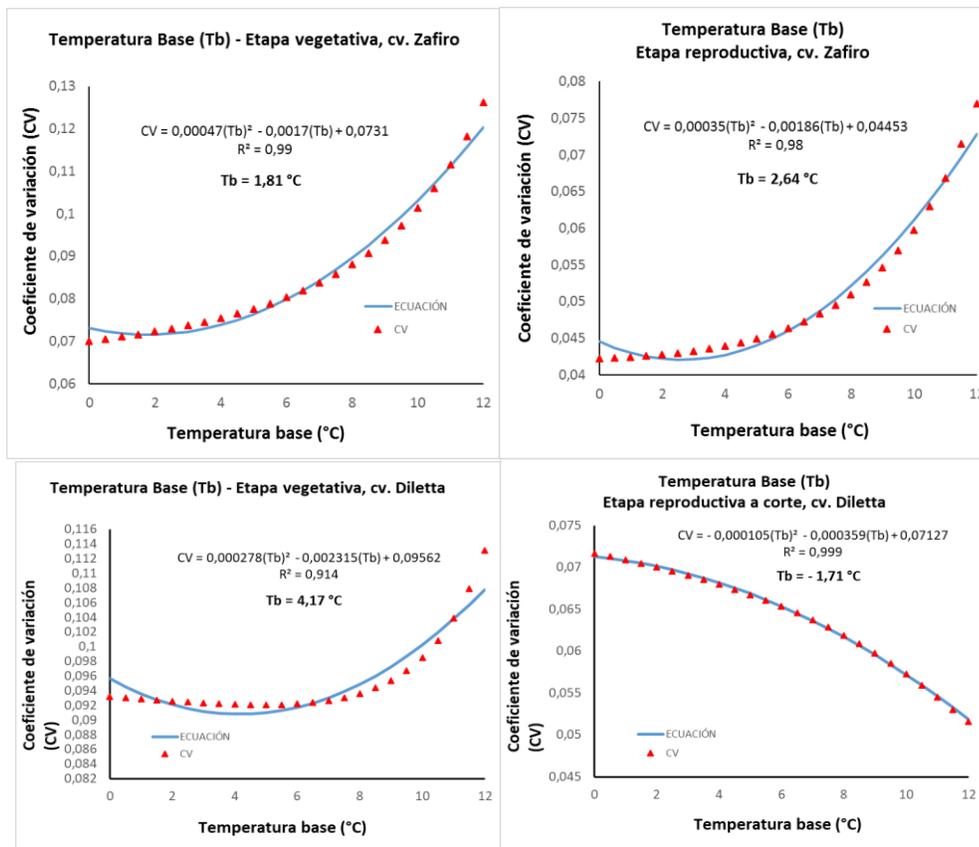
Estimación de temperatura base (Tb)

Los modelos térmicos requieren conocer la Temperatura base de cada cultivo para cada estado fenológico, para poder estimar los grados día de crecimiento correspondientes (Hou *et al.*, 2014). Para la estimación de los valores medios de la temperatura base en las tres variedades, se tomaron en cuenta los datos de las siembras realizadas el 3 de marzo, el 21 de julio y el 29 de septiembre del 2018; los valores obtenidos en la primera siembra realizada el 14 de febrero del 2018 se usaron para validar los resultados obtenidos (validación cruzada).

De los métodos utilizados, el que estimó la Tb de manera más lógica de acuerdo con la fisiología del clavel, fue el método de menor coeficiente de variación en GDD utilizando un modelo de regresión cuadrático. Los resultados obtenidos por los métodos de la menor varianza en GDD y la menor desviación estándar no fueron considerados, debido a que las Tb presentaron valores entre 14 y 22,5°C, lo cual no corresponde a un cultivo de clima frío como lo es el clavel.

Figura 6. Temperaturas base (Tb) para las etapas fenológicas de las tres variedades de clavel, estimadas para el mínimo Coeficiente de Variación (CV) de las cantidades de calor calculados (GDD) o donde la pendiente (primera derivada) del modelo de regresión es igual a cero





La Figura 6 muestra el coeficiente de variación y la ecuación de regresión para el calor total acumulado utilizado para estimar las temperaturas de referencia para los tres cultivares considerados en este estudio en varias etapas estacionales, en la cual se observa que se presenta una tendencia en común, a excepción de las figuras correspondientes a la variedad Diletta para las cuales se obtuvieron los valores de temperatura base usando el punto en la figura de coeficiente variación vs la temperatura base, donde la pendiente (primera derivada) del modelo de regresión es igual a cero.

Tabla 6. Temperatura base para las diferentes etapas fenológicas en tres variedades de clavel

ETAPA FENOLOGICA	VARIEDAD		
	MIZUKY	ZAFIRO	DILETTA
Vegetativa	0,66	1,81	4,17
Reproductiva	0,84	2,64	-1,71
Vegetativa hasta corte	0,48	0,29	-0,50

La tabla 6 muestra los valores obtenidos de las temperaturas base (Tb), para las etapas fenológicas en las tres variedades de clavel estudiadas. Los resultados comprueban que

el valor de la temperatura base depende de la variedad y de la etapa de desarrollo del cultivo, donde la variedad Mizuky es aquella que presenta una menor temperatura base en la fase vegetativa con $0,66^{\circ}\text{C}$, mientras que para la fase reproductiva la variedad Diletta es la que presenta menor temperatura base con $-1,71^{\circ}\text{C}$. Sin embargo, considerando el ciclo desde la fase vegetativa hasta el final del corte, las tres variedades presentan valores de T_b cercanos a 0°C , siendo la variedad Diletta la que presenta menor temperatura base ($-0,50^{\circ}\text{C}$).

Por medio de una prueba t se determinó que existen diferencias entre todas las temperaturas base en cada etapa fenológica para cada variedad, por lo cual no se puede utilizar una única temperatura base en todas las etapas fenológicas de cada variedad.

Los resultados obtenidos en esta investigación en las tres variedades para la temperatura base varían entre $-1,71$ a $4,17^{\circ}\text{C}$ dependiendo de la variedad y la etapa fenológica, concordando con los datos de la temperatura base obtenida por López *et al.* (2010), quienes estimaron la temperatura base para la aparición de nudos de clavel variedad Delphi, encontrando que la temperatura base estimada es estadísticamente igual a 0°C , con un valor de $0,12^{\circ}\text{C}$, que es el mismo valor determinado para la elongación de entrenudos en crisantemo (Larsen y Gertsson, 1992). Sin embargo, esta es inferior a las temperaturas reportadas para otros procesos fenológicos, por ejemplo, la temperatura para la emergencia de los pétalos de rosa es de $5,2^{\circ}\text{C}$ (Mattson y Lieth, 2007). Esto puede presentarse dado que el clavel es nativo de Europa Meridional y Asia Occidental (Dona *et al.*, 2017).

Filgueira (2011) describe que existen diferentes tipos de claveles y cada uno de estos se puede cultivar exitosamente en las partes más frías de las llanuras y en elevaciones medias a altas; actualmente existen tres eco-tipos de clavel que son producidos comercialmente, el primero de origen mediterráneo y los otros dos desarrollados en Estados Unidos; de acuerdo con ello, "el género *Dianthus* estaría adaptado a regiones frías".

Estimación del tiempo térmico (GDD)

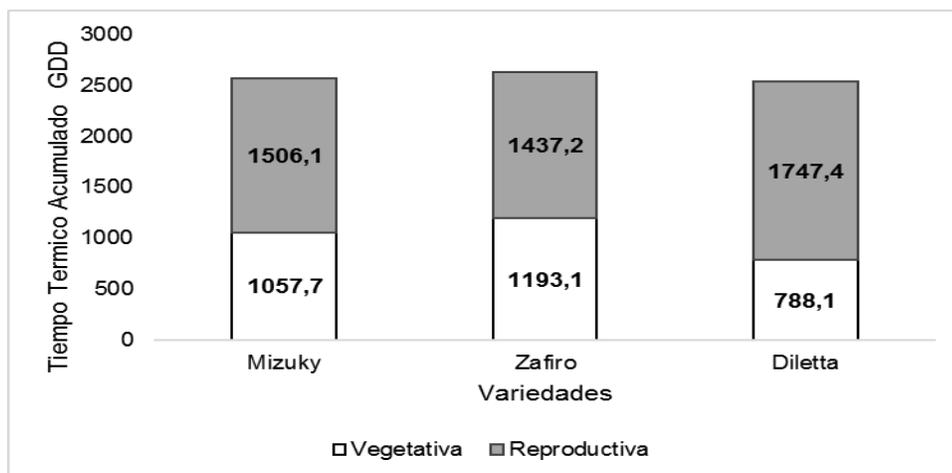
El tiempo de cada etapa en GDD para cada una de las siembras consideradas en este estudio se determinó a partir de los valores de temperatura basal estimados para cada una de las dos etapas fenológicas de cada cultivar estudiado (Tabla 7).

Tabla 7. Valores medios de Tiempo Térmico (GDD) para las etapas fenológicas de las tres variedades de clavel (Media ± DS)

ETAPA FENOLOGICA	VARIEDAD		
	MIZUKY GDD (°C)	ZAFIRO GDD (°C)	DILETTA GDD (°C)
Vegetativa	1057,7 ± 178,5	1193,1 ± 85,9	788,1 ± 72,6
Reproductiva	1506,1 ± 232,9	1437,2 ± 61,8	1747,4 ± 127,3
Vegetativa hasta corte	2606,0 ± 306,1	2624,2 ± 150,5	2512,0 ± 179,1

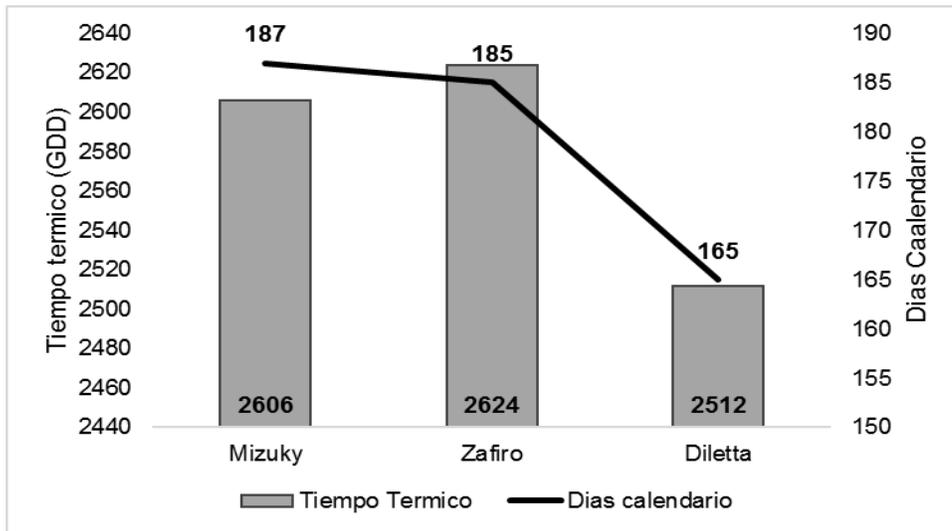
Revisando el tiempo térmico acumulado para cada variedad (Figura 7), se observa que cada una se comporta de manera diferente en cuanto a la acumulación de grados día para cada etapa fenológica, lo cual concuerda con lo indicado por Phadnawis y Saini (1992) y Qadir *et al.* (2006), aunque la acumulación de grados día de desarrollo en las distintas etapas fenológicas es relativamente estable e independiente del tiempo de siembra, observamos que cada híbrido, cultivar o cultivar semilla puede tener valores específicos en estos parámetros.

Figura 7. Comparación del valor medio de tiempo térmico acumulado para cada etapa fenológica de tres variedades de clavel



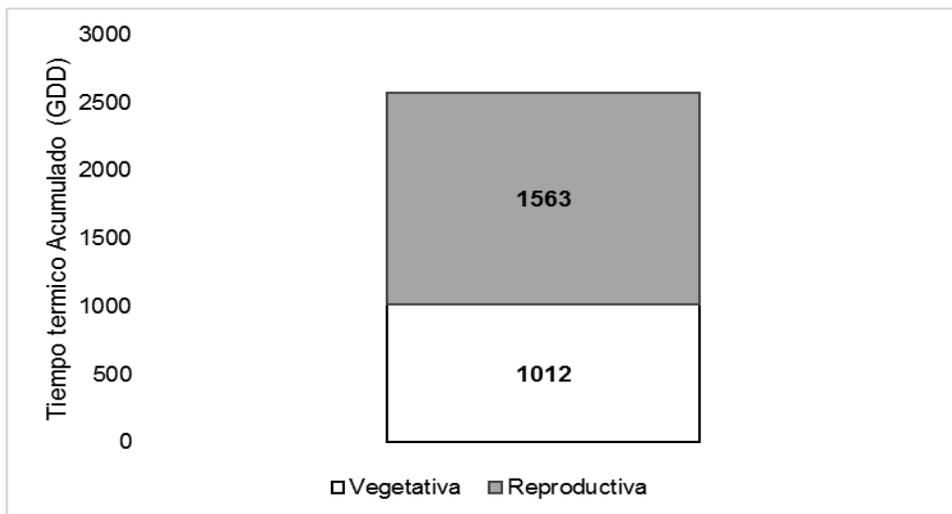
En la figura 8 se observa el valor medio del tiempo térmico total acumulado por cada variedad, siendo la variedad Diletta la que tiene un menor requerimiento térmico con 2511 GDD, coincidiendo con la variedad que presenta el menor número de días calendario para terminar su ciclo de vida; sin embargo al revisar las variedades Mizuky y Zafiro, presentan un comportamiento similar en cuanto al tiempo térmico total acumulado, al igual que la cantidad de días calendario desde el despunte hasta el fin del corte.

Figura 8. Comparación del valor medio del tiempo térmico total acumulado para las tres variedades de clavel



Considerando los resultados obtenidos se puede decir que el clavel requiere una media de 1012 GDD (°C d) desde el despunte hasta el final de la fase vegetativa, 1563 GDD para ir del final de la fase vegetativa hasta el final de la formación del botón floral; en general, el tiempo necesario para llegar al corte de la flor desde el despunte es de 2580,7 GDD, variando desde 165 hasta 185 días dependiendo la variedad, con un promedio de 179 días (Figura 9).

Figura 9. Tiempo térmico medio acumulado para cada etapa fenológica en clavel



Los resultados en el presente estudio son similares a los obtenidos por López *et al.* (2010) para clavel variedad Delphi, quienes encontraron que para el pico de cosecha se acumularon 2.226,5 GDD; sin embargo, al comprar el tiempo térmico en la etapa vegetativa este es superior, ya que los autores reportaron 1.363,2 GDD, sumados a partir del despunte (pinch), hasta la visualización del botón floral, lo cual puede deberse a la diferencia de las variedades estudiadas (Qadir *et al.*, 2006; Phadnawis y Saini, 1992).

Validación cruzada

La validación cruzada mostró que el modelo desarrollado y utilizado en esta investigación para la obtención de los grados días se ajusta para las tres variedades de clavel, ya que se obtuvieron valores del error cuadrático medio (RMSE) bajos, lo cual indica que los valores predichos son muy cercanos a los valores observados.

Tabla 8. Errores RMSE obtenidos en la validación cruzada por variedad

Variedad	Misuky	Zafiro	Diletta
RMSE	1,439	1,996	1,934

3.2.4 Conclusiones

La temperatura base (Tb) depende de la variedad y la etapa de desarrollo del cultivo; en general la Tb obtenida en este estudio varía entre -1,71 y 4,17°C, dependiendo la variedad y la etapa fenológica; donde la variedad Mizuky presenta la menor Tb en la fase vegetativa (0,66°C) y la variedad Diletta la menor Tb en la fase reproductiva (-1,71°C). Para el ciclo desde la fase vegetativa hasta el final del corte, las tres variedades presentan valores de Tb cercanos a 0°C, siendo la variedad Diletta la que presenta menor Tb (-0,50°C); por lo cual no se puede utilizar una única temperatura base en todas las etapas fenológicas de cada variedad.

Cada variedad se comporta de manera diferente en cuanto a la acumulación de grados día para cada etapa fenológica; la variedad Diletta tiene el menor requerimiento térmico con 2511 GDD. En general, el tiempo necesario para llegar al corte de la flor desde el despunte es de 2580,7 GDD, variando desde 165 hasta 185 días dependiendo la variedad, con un promedio de 179 días.

3.2.5 Bibliografía

- Arnold, C. (1959).** The determination and significance of the base temperature in a linear heat unit system. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.*, 74: 430-445
- Bordón, F. Y. y Blasco, A. E. (2018).** Planificación de cultivos, Editorial Sintesis S.A., España.
- Clay, P. A., Young, K. M. & Taylor, E. R... (2006).** Effect of heat unit accumulation on cotton defoliation, lint yield and fiber quality. *Arizona Cotton Report (P-145)*: 245-250.
- Dona, A. J., Fatmi, M. U, Singh, D. & Benny, J. C. (2017).** Evaluation of carnation (*Dianthus caryophyllus* L.) varieties under naturally ventilated polyhouse, *Plant Archives*, 17(2): 1262-1266
- Figueira, J. (2011).** Experiencias en mejoramiento del clavel (*Dianthus caryophyllus* L.). Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia.
- Hou, P., Liu, Y., Xie, R., Ming, B., Ma, D., Li, S. y Mei, X. (2014).** Temporal and spatial variation in accumulated temperature requirements of maize. *Field Crops Res.*, 158: 55-64.
- Larsen, R. & Gertsson, U. (1992).** Model analysis of shoot elongation in *Chrysanthemum x morifolium*. *Sci. Hortic.* 49(3-4): 277-289.
- López M., M., Chaves, B., Flórez R., V. y Salazar, M. (2010).** Modelo de aparición de nudos en clavel (*Dianthus caryophyllus* L.) cv. Delphi cultivado en sustratos. *Agronomía Colombiana*, 28(1): 47-54.
- Mattson, N. S. & Lieth, J. H. (2007).** The effect of temperature on yearround development of rose shoots initiated using cutting or bending. *Acta Hort.*, 751: 121-129
- Matzarakis, A., Ivanova, D., Balafoutis, C., y Makrogiannis, T. (2007).** Climatology of growing degree days in Greece. *Clim. Res.*, 34: 233-240. Doi: 10.3354/cr00690.
- McMaster, G. S.,y Wilhelm, W. W. (1997).** Growing degree-days: one equation, two interpretations. *Agric. For. Meteorol.*, 87(4): 291-300. Doi:10.1016/S0168-1923(97)00027-0.
- Parra-Coronado, A., Fischer, G., y Chaves-Cordoba, B. (2015).** Tiempo térmico para estados fenológicos reproductivos de la feijoa (*Acca sellowiana* (O. Berg) Burret). *Acta Biol. Colomb.*, 20(1): 163-173.
- Perry, K. B., Wehner, T. C., y Johnson, G. L. (1986).** Comparison of 14 methods to determine heat unit requirements for cucumber harvest. *HortScience*, 21(3): 419-423.
- Phadnawis, N. B. y Saini, A. D. (1992).** Yield models in wheat based on sowing time and phenological development. *Annals of Plant Physiology*, 6: 52-59.

Qadir, G., Ahmad, S., Hassan, F., y Cheema, M. A. (2006). Oil and fatty acid accumulation in sunflower as influenced by temperature variation. *Pakistan Journal of Botany*, 38(4): 1137-1147.

Salazar, M. R. (2006). Un modelo simple de producción potencial de uchuva (*Physalis peruviana* L.). Tesis de Doctorado en Ciencias Agropecuarias – Área Agraria. Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

Salazar-Gutiérrez, M. R., Johnson, J., Chaves-Cordoba, B., y Hoogenboom, G. (2013). Relationship of base temperature to development of winter wheat. *Int. J. Plant Prod.*, 7(4): 741-762.

Sikder, S. (2009). Accumulated heat unit and phenology of wheat cultivars as influenced by late sowing heat stress condition. *J. Agric. Rural Dev.*, 7(1-2): 57-64.

Wilson, L. T. y Barnett, W. (1983). Degree-Days: An aid in crop and pest management. *California Agriculture*, 37: 4-7.

4. Conclusiones y recomendaciones generales

4.1 Conclusiones

Las tres variedades evaluadas presentaron diferentes tiempos fenológicos entre ellas; las variedades Mizuky y Diletta presentan un comportamiento similar en las etapas reproductiva y vegetativa; en el caso del corte son Mizuky y Zafiro las variedades que se comportan similar. Las tres variedades presentan diferentes tiempos en los ciclos desde la siembra hasta la finalización del pico de corte entre ellas; la variedad Diletta es la más precoz de las tres, mientras que las variedades Mizuky y Zafiro son similares, por lo cual se recomienda realizar manejos diferentes a las tres variedades.

La construcción de la escala BBCH para el cultivo comercial de clavel se constituye en una herramienta importante para entender el crecimiento y desarrollo de la planta; sin embargo, en términos comerciales y los distintos modelos de producción de clavel que se presentan en el país, es importante entender y evaluar otros modelos de crecimiento que se ajustan mejor al modelo de producción actual, donde se incluyan variables climáticas que pueden influenciar el crecimiento de la planta.

Los valores de T_b y grados día de crecimiento (GDC o GDD) varían dependiendo de la etapa de desarrollo y la variedad de clavel evaluada. Las T_b en todas las etapas, independientemente de la variedad, presentaron diferencias estadísticamente significativas entre ellas. En general se tiene una media de 2580,7 GDD y 179 días para llegar de pinch a cosecha de la flor de clavel. Se encontró buen ajuste estadístico entre los valores estimados y observados.

El conocimiento de cada temperatura base, así como de los días transcurridos desde el pinch hasta el corte y los GDD acumulados para cada variedad, dan una gran

oportunidad para la implementación de nuevos modelos de simulación para el cultivo comercial de clavel. Estos modelos para cada fase específica de desarrollo pueden ser útiles para el manejo del cultivo en diferentes actividades como fertilización, riego y refuerzos para los posteriores repiques de producción, programación de pinch y fechas de futuras siembras, además de otras prácticas culturales asociadas a las diferentes etapas fenológicas del cultivo de clavel. Con los manejos adecuados del cultivo es posible obtener los mayores volúmenes de producción en las fechas del año esperadas y de esta manera lograr mayores ingresos económicos por los precios diferenciados en las diferentes fiestas que se manejan en el cultivo de clavel. Estos resultados se obtendrán de una buena programación de la fecha de cosecha, la cual se puede predecir utilizando GDD con base en la T_b estimada para cada etapa de desarrollo individual.

4.2 Recomendaciones

Considerando el número elevado de variedades de clavel cultivadas comercialmente, los diferentes sistemas de producción de flores comerciales, manejos de la plantación y manejo de las labores culturales que pueden existir en las diferentes zonas productoras, se recomienda:

- Realizar una correlación del modelo fisiológico con la radiación, ya que el clavel es una planta de día largo facultativo, lo que puede afectar el tiempo de cada estado fenológico.
- Estimar la duración de los estados fenológicos y la temperatura base en otras variedades de clavel con el fin de realizar evaluaciones adicionales en el modelo fisiológico, con el fin de validar los datos obtenidos en esta investigación.
- Realizar evaluaciones adicionales de la influencia de las condiciones climáticas en el comportamiento en el crecimiento y cosecha del clavel.