



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

Faculdade de Engenharia de Alimentos

ERICSEM PEREIRA

**AVALIAÇÃO DA VIDA ÚTIL DINÂMICA DE UVAS: MODELAGEM
MATEMÁTICA DA PERDA DE MASSA POR TRANSPIRAÇÃO**

**CAMPINAS
2017**

ERICSEM PEREIRA

**AVALIAÇÃO DA VIDA ÚTIL DINÂMICA DE UVAS: MODELAGEM
MATEMÁTICA DA PERDA DE MASSA POR TRANSPIRAÇÃO**

**Dissertação de Mestrado apresentada à
Faculdade de Engenharia de Alimentos da
Universidade Estadual de Campinas como
parte dos requisitos exigidos para a
obtenção de título de Mestre em Engenharia
de Alimentos.**

Orientador: Prof. Dr. Vivaldo Silveira Júnior

Coorientador: Dr. Wigberto Antonio Spagnol

**ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À
VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO
DEFENDIDA PELO ALUNO ERICSEM
PEREIRA, ORIENTADA PELO PROF.
DR. VIVALDO SILVEIRA JÚNIOR E
COORIENTADA PELO DR. WIGBERTO
ANTONIO SPAGNOL.**

**CAMPINAS
2017**

Agência(s) de fomento e nº(s) de processo(s): CNPq, 142688/2015-0; FAPESP, 2015-15570-2

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7250-6989>

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Faculdade de Engenharia de Alimentos
Márcia Regina Garbelini Sevillano - CRB 8/3647

P414a Pereira, Ericsem, 1988-
Avaliação da vida útil dinâmica de uvas : modelagem matemática da perda de massa por transpiração / Ericsem Pereira. – Campinas, SP : [s.n.], 2017.

Orientador: Vivaldo Silveira Júnior.
Coorientador: Wigberto Antonio Spagnol.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia de Alimentos.

1. Modelagem. 2. Uva de mesa. 3. Vida útil. 4. Qualidade pós-colheita. I. Silveira Júnior, Vivaldo. II. Spagnol, Wigberto Antonio. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia de Alimentos. IV. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Evaluation of table grapes dynamic shelf-life : mathematical modelling of mass loss due to transpiration

Palavras-chave em inglês:

Modelling

Table grape

Shelf-life

Postharvest quality

Área de concentração: Engenharia de Alimentos

Titulação: Mestre em Engenharia de Alimentos

Banca examinadora:

Vivaldo Silveira Júnior [Orientador]

Douglas Fernandes Barbin

Franciane Colares Souza Usberti

Data de defesa: 23-03-2017

Programa de Pós-Graduação: Engenharia de Alimentos

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Vivaldo Silveira Júnior (Orientador)

Faculdade de Engenharia de Alimentos – UNICAMP

Prof. Dr. Douglas Fernandes Barbin (Membro)

Faculdade de Engenharia de Alimentos – UNICAMP

Profa. Dra. Franciane Colares Souza Usberti (Membro)

Faculdade de Engenharia Agrícola – UNICAMP

Profa. Dra. Barbara Teruel Mederos (Suplente)

Faculdade de Engenharia Agrícola – UNICAMP

Profa. Dra. Alessandra Lopes de Oliveira (Suplente)

Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos - USP

Ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no processo de vida acadêmica do aluno.

Dedico este trabalho à um Deus amoroso que me deu força para completá-lo, à minha mãe e meu pai, meus exemplos de fé e de esperança.

AGRADECIMENTOS

Eu gostaria de agradecer à minha família e amigos que acreditaram em mim e me deram forças para que eu completasse mais essa etapa na minha vida. É um prazer dedicar essa conquista à vocês e tenho plena certeza de que sozinho eu não teria o fôlego necessário para completar essa maratona que é a pós-graduação. Certamente outros desafios virão, no entanto, cada vitória merece ser comemorada e nesse momento meu sentimento é de gratidão e dever cumprido.

Agradeço a minha mãe Luzia Silva Pereira que acreditou nos meus sonhos e planos e me deu apoio e amor incondicionais para que eu viesse para Campinas alcançar novos voos. Ela foi meu alicerce quando me senti inseguro e suas palavras de fé me encorajaram a prosseguir.

Agradeço ao meu pai Almir Pereira, o qual em nenhum momento duvidou que eu fosse capaz de atingir minhas metas e realizar meus sonhos. Sigo firme acreditando que tenho seu apoio. Seus exemplos de integridade e comprometimento me levaram a ser quem sou.

Sou muito grato à minhas irmãs Lorena e Lívia que sempre depositaram em mim confiança. Creio que sou imensamente abençoado por tê-las em minha vida e poder compartilhar com ambas as alegrias e ansiedades dessa jornada maravilhosa que é a vida.

Agradeço também à minha namorada Débora pelo companheirismo e dedicação em todos os momentos. Seus conselhos e sugestões me abriram novas possibilidades e me deram a confiança para acreditar que eu sou capaz de vencer, sou um campeão! Sou muito grato pelo seu carinho e pela sinceridade de suas palavras e sentimentos.

Finalmente agradeço à um Deus amoroso e todo poderoso. Creio que a Sua vontade é boa e o Seu amor por mim é incondicional. Tenho Nele firme apoio e sei que Ele está ao meu lado caminhando comigo. “Certamente que a bondade e a misericórdia me seguirão todos os dias da minha vida; e habitarei na casa do Senhor por longos dias” (Sl 23.6).

RESUMO

As condições climáticas afetam diretamente a qualidade pós-colheita de frutas e, se não controladas, podem ser um fator crítico na diminuição de sua vida útil. Em uvas de mesa (*Vitis Vinifera L.*), a qualidade é afetada principalmente pela desidratação dos cachos, a qual promove escurecimento da ráquis e aparência ressecada nas bagas. Em uma cadeia logística de distribuição, flutuações nas condições de temperatura e umidade relativa (UR) são comuns e podem intensificar a deterioração da qualidade. O objetivo principal desse estudo foi desenvolver um modelo preditivo para a perda de massa por transpiração em uvas de mesa, validando as previsões do modelo em cenários de temperatura e UR variáveis. Realizaram-se ensaios experimentais para avaliar também as correspondências entre as perdas de massa dos cachos e as alterações no seu aspecto visual e o efeito de tempos de atraso para dar início ao resfriamento (*cooling delays*) sobre as suas taxas de transpiração. Assim, uvas das variedades ‘Crimson Seedless’ e ‘Niagara’ foram armazenadas em ambientes de temperatura controlada (em torno de 2, 5, 10 e 15 °C) com UR aproximadamente constantes (45 a 60%) e a redução da massa inicial foi medida durante o período de testes. Os dados experimentais obtidos foram utilizados para estimar os parâmetros do modelo preditivo por meio de regressão não linear. Subsequentemente, ensaios de validação, nos quais amostras de ambas as variedades de uvas foram armazenadas em refrigeradores comuns sujeitas a flutuações de temperatura e UR, foram utilizados para avaliar as previsões feitas pelo modelo para a perda de massa das uvas. Os testes de validação comprovaram a habilidade preditiva do modelo, o qual descreveu adequadamente a perda de massa das uvas de ambas as variedades. Portanto, o método aplicado foi útil para fazer o ajuste do modelo preditivo, uma vez que o modelo parametrizado ofereceu estimativas satisfatórias para a perda de massa das uvas. As observações experimentais do aspecto visual dos cachos e da ráquis mostraram que o nível crítico de perda de massa nos cachos depende da variedade estudada, bem como os ensaios com *cooling delays* indicam que a extensão dos danos causados nos frutos varia de acordo com a cultivar. Os ensaios com *cooling delays* também mostraram que as taxas de transpiração de frutos que passaram por esses tratamentos antes de serem armazenados em refrigeração constante não diferem significativamente daquelas de frutos que não passaram pelos tempos de espera antes do início do resfriamento.

Palavras-chave: Modelagem. Uva de mesa. Qualidade pós-colheita. Vida útil.

ABSTRACT

Climatic conditions directly affect fruits post-harvest quality, and if not controlled, may be a critical factor reducing their shelf-life. In table grapes (*Vitis Vinifera L.*), quality is affected mainly by cluster dehydration, which promotes rachis browning and shriveled berry surfaces. In a logistic chain of distribution, fluctuations in temperature and relative humidity (RH) conditions are common and may intensify quality decay. The main objective of this study was developing a predictive model to mass loss by transpiration for table grapes, validating the model predictions in scenarios of variable temperature and RH conditions. Experimental tests also evaluated the correspondence between clusters mass loss and visual aspects changes and the effect of cooling delays in transpiration rates of the fruit. Thus, table grapes of cultivars 'Crimson Seedless' and 'Niagara' were stored in controlled temperature environments (around 2, 5, 10 and 15 °C) with RH approximately constant (45 to 60%) and the initial mass reduction was measured during the experiment period. The obtained experimental data was used to fit a predictive model and estimate its constant parameters. Subsequently, validation tests, in which samples were stored in common refrigerators subjected to temperature and RH fluctuations, were used to evaluate model predictions for grapes mass loss. Validation tests confirmed the predictive ability of the model, which described adequately the table grapes mass loss for both cultivars. Therefore, the method applied was useful to calibrate the predictive model, since the parametrized model yielded satisfactory estimations for the table grapes mass loss. The experimental observations of the visual aspect have shown that the critical level of cluster mass loss depends on the cultivar studied, as well as the cooling delays tests indicate that the extend of the mass loss damage vary from one cultivar to another. Cooling delay tests have also shown that the transpiration rates of grapes submitted to these treatments before refrigerated storage are not significantly different from those of fruits immediately refrigerated.

Keywords: Modelling. Table grape. Postharvest quality. Shelf-life.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2 OBJETIVOS	12
2.1 Objetivos específicos	12
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
3.1 Deteriorações da qualidade e aspectos ambientais	14
3.2 Modelos preditivos	17
3.2.1 <i>Respiração</i>	22
3.2.2 <i>Alterações de firmeza e cor</i>	24
3.2.3 <i>Taxa de transpiração e perda de massa</i>	27
3.3 Qualidade de uvas de mesa	31
4 MATERIAL E MÉTODOS	35
4.1 Uvas	35
4.2 Procedimento experimental	36
4.2.1 <i>Simulação de tempos de espera</i>	37
4.2.2 <i>Testes de validação do modelo</i>	38
4.2.3 <i>Análises adicionais</i>	38
4.3 Modelagem matemática	38
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
5.1 Perda de massa das uvas nas temperaturas constantes.....	42
5.1.1 <i>Temperatura de superfície dos frutos</i>	47
5.2 Efeitos dos tempos de espera	48
5.3 Escurecimento da ráquis e aspecto visual dos cachos	53
5.3.1 <i>Escurecimento da ráquis</i>	53
5.3.1 <i>Aspecto visual dos cachos</i>	56
5.4 Parametrização e validação do modelo preditivo	58
5.4.1 <i>Ajuste de parâmetros</i>	58
5.4.2 <i>Validação do modelo</i>	61
6 CONCLUSÕES	67
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	68
REFERÊNCIAS	69

1 INTRODUÇÃO

A maioria dos consumidores concorda que eles têm o direito de saber algo sobre a idade, i.e., a data de fabricação e o prazo de validade estimado, dos alimentos que eles compram (LABUZA, 1982). Além disso, a cobertura dada pela grande mídia aos temas relacionados à qualidade de alimentos tem aumentado a sua preocupação em relação ao tema. No Brasil, a legislação estabelece que os alimentos perecíveis embalados devam ter em seus rótulos instruções para a conservação nas fases de transporte, comercialização e consumo. Oferecendo orientação segura para que o alimento não se torne impróprio para consumo, (CISA, 1984). No entanto, o que a indústria de alimentos usualmente faz é estabelecer prazos aproximados para que o produto seja consumido sem oferecer maiores riscos ao consumidor, não se preocupando em oferecer maiores informações sobre as alterações que o produto pode sofrer durante esse período. Esse cenário é especialmente evidenciado na indústria de frutas e hortaliças não processadas.

Uma vez que o valor de um produto é estabelecido pelo próprio usuário, baseado nas propriedades percebidas de uma espécie em particular (e.g. conteúdo de açúcar é percebido como sabor doce), há uma relação entre a preferência do consumidor e a composição química das frutas (CRISOSTO; CRISOSTO, 2002). O valor de um produto em particular também é estabelecido com base no ambiente mercadológico, onde ele é vendido, e na intenção de uso do comprador, o qual utiliza essas três noções para decidir se aceita ou não o produto em questão. O termo *keeping quality* (manutenção da qualidade), desenvolvido para se referir ao tempo que um produto permanece consumível, está fortemente ligado ao conceito de aceitabilidade (RICO et al., 2007). No entanto, do ponto de vista da tecnologia de pós-colheita o tema precisa ser abordado a partir de um modelo conceitual mais fundamentalista.

Nesse âmbito, a modelagem matemática, construída sobre fundamentos da natureza (e. g. cinéticas químicas, leis da física) e orientada para os processos, se apresenta como poderosa ferramenta capaz de descrever fenômenos sob quaisquer circunstâncias da cadeia de suprimentos. Os atributos sensoriais mais avaliados pelos consumidores de frutas e hortaliças (e. g. cor, textura) podem ser traduzidos em propriedades físicas ou químicas (e. g. concentração de pigmentos, estrutura dos tecidos), assim a modelagem pode ser inteiramente baseada nas propriedades relevantes do produto (TIJSKENS; SCHOUTEN, 2009). No caso de uvas, os cachos são muito sensíveis à perda de água, resultando em escurecimento da ráquis e aspecto murcho e ressecado das bagas (CRISOSTO; MITCHELL, 2002). Assim, a qualidade percebida desse produto é diretamente afetada pelo fenômeno de perda de água

decorrente do processo de transpiração. Processo o qual está fortemente correlacionado às condições ambientais e pode facilmente ser mensurado pela diminuição da massa inicial dos frutos (MAGUIRE; BANKS; OPARA, 2001).

O presente estudo teve como objetivo construir e validar um modelo preditivo para avaliar a vida útil dinâmica de uvas, tendo como base a influência de temperatura e umidade relativa (UR) na perda de massa e redução da qualidade global da fruta.

2 OBJETIVOS

O objetivo principal desse estudo foi desenvolver um modelo preditivo para a perda de massa em uvas a partir de um modelo genérico para taxa de transpiração em frutas, avaliando a viabilidade da abordagem utilizada por meio de testes de validação em históricos de temperatura e umidade relativa (UR) variáveis.

2.1 Objetivos específicos

- Quantificar experimentalmente as taxas de perda de massa de uvas das variedades ‘Crimson Seedless’ e ‘Niagara’ quando armazenadas em condições de conservação constantes;
- Correlacionar o percentual de perda de massa dos cachos ao aspecto visual das bagas e da ráquis em ambas as variedades estudadas;
- Avaliar se os tempos de atraso para dar início ao resfriamento dos frutos poderiam ter um efeito irreversível sobre o seu metabolismo;
- Obter, a partir de dados experimentais, parâmetros para o modelo proposto e realizar testes de validação do ajuste do modelo utilizando históricos de temperatura e UR variáveis para diferentes cenários.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Perdas de qualidade em produtos vegetais frescos têm impactos econômicos e ambientais de proporções globais. Estima-se que cerca de 50% do volume inicialmente produzido de FLV (Frutas, Legumes e Verduras) são perdidos anualmente em diferentes regiões do mundo. Nos países em desenvolvimento, cerca de 30 a 40% da produção é perdida nas etapas de pós-colheita, processamento e distribuição (GUSTAVSSON; CEDERBERG; SONESSON, 2011). Entre as principais causas para o desperdício de alimentos estão a deterioração provocada pela falta de acondicionamento adequado em climas quentes e úmidos e a sazonalidade que gera excedentes da produção. Perdas pós-colheita de produtos perecíveis causam um grande efeito em economias baseadas no agronegócio. Devido a isso, várias estratégias estão sendo desenvolvidas com vistas à manutenção da boa qualidade da produção de frutas (SONKER; PANDEY; SINGH, 2016). Um fator essencial para reverter o quadro atual de alto desperdício é implantar uma boa gestão da cadeia de suprimentos. São numerosos os estudos que relatam os benefícios obtidos pela utilização da gestão logística inteligente e estratégias de definição de mercados alvo (JEDERMANN et al., 2014a, 2014b; KETZENBERG; BLOEMHOF; GAUKLER, 2015). Essas estratégias e sistemas de gestão utilizam como princípio os conceitos de uniformidade das condições de conservação do produto e manutenção da qualidade máxima até a entrega ao consumidor final.

Como tecidos vivos, frutas e hortaliças estão sujeitos a mudanças contínuas desde a colheita. Algumas delas são desejáveis, no entanto a maioria não é (KADER, 2002a). O autor explica que apesar das alterações metabólicas pós-colheita serem inevitáveis é possível desacelerá-las, principalmente, pelo gerenciamento de baixas temperaturas. Considerando que essa ferramenta é a mais efetiva para estender a vida útil de produtos hortícolas, deve começar pela redução do tempo de espera para remoção do calor de campo. São muitos os autores que relatam os efeitos nocivos dos chamados tempo de espera (*cooling delays*), período entre a colheita do fruto e o início do processo de resfriamento (GARRIDO; TUDELA; GIL, 2015; JOHNSTON; HEWETT; HERTOOG, 2005; PAULL, 1999). Assim, é evidente a necessidade de uma cadeia de suprimentos que aplique “o frio”, pois o quanto antes esses produtos forem refrigerados, maior será a vida útil do produto.

A chamada cadeia do frio é formada por um conjunto de instrumentos e controles destinados a manter as baixas temperaturas. Sua integridade deve ser preservada do ponto de produção e processamento até o armazenamento final. As etapas de transporte (e.g. carregamento, descarregamento) desempenham um papel fundamental na realização deste

objetivo (MONTANARI, 2008). Como é formada por elos, os quais se referem às diferentes etapas pelas quais os produtos se movem ao longo do sistema, a cadeia conta com fornecedores e clientes distintos, os quais possuem diferentes expectativas em relação à qualidade do produto. Por exemplo, a venda de uma fruta em estágio de maturação avançado pode ser interessante caso o cliente seja o consumidor final, i.e., o produto apresenta melhores características de sabor e aroma. No entanto, essa mesma fruta pode não ser interessante em casos nos quais o cliente a ser atendido é um supermercado ou mercado de hortifrúti, uma vez que frutas em estágio de maturação avançado possuem menor tempo de comercialização (HERTOG et al., 2014). Para reduzir as perdas e desperdícios, produtores e distribuidores devem entender o impacto dos fatores biológicos e ambientais envolvidos nos processos de deterioração. Essas informações podem ser utilizadas na tomada de decisões e no gerenciamento da distribuição dos diferentes lotes de produção (HERTOG et al., 2015), conforme a sua expectativa de vida útil.

3.1 Deteriorações da qualidade e aspectos ambientais

A deterioração de qualidade em produtos alimentícios é usualmente avaliada pela medida de um ou mais atributos característicos (TAOUKIS; LABUZA, 1989). Em frutas e hortaliças essa deterioração depende de muitos fatores. Por décadas, a manipulação apropriada desses produtos no período pós-colheita tem sido um desafio em relação à manutenção de sua qualidade (PALOU et al., 2010). Uma vez colhidos, os frutos estão separados da planta mãe, logo estão privados da sua fonte original de água, nutrientes e hormônios. Como uma consequência natural desse processo, fatores como a transpiração e a respiração podem levar a desidratação e senescência dos frutos. Além disso, o crescimento de organismos patogênicos e danos físicos causam desperdício direto do produto devido aos seus impactos no aspecto visual. Para a maioria dos produtos frescos não processados, o tempo de vida útil pode ser definido como o período no qual o produto é considerado aceitável para a venda ao consumidor final, tomando como base uma determinada característica físico-química ou sensorial (AKED, 2000). No entanto, o tempo de vida útil só pode ser definido levando em consideração alguns aspectos ambientais. Alguns autores estimam que os produtos hortícolas tenham suas taxas respiratórias aumentadas de duas a quatro vezes a cada 10 °C de aumento na temperatura (SANDHYA, 2010; THOMPSON, 2002). Outros autores comprovam que o decaimento da qualidade em frutas e hortaliças é fortemente influenciada pelas condições de temperatura e umidade relativa (UR) nos pontos de exposição (NUNES et al., 2009).

Temperatura é o fator que afeta mais substancialmente a velocidade de reação em vários processos metabólicos. Acréscimos de alguns graus provocam aumento em taxas respiratórias, aceleram processos enzimáticos, além de desencadear várias outras reações relacionadas às alterações de propriedades sensoriais como textura, cor e sabor (CASTELLANOS; HERRERA, 2015). Além disso, o aquecimento do ar resulta em acréscimo na taxa de transpiração dos frutos, propiciando a transferência de água do produto para o ar, e aumento na capacidade atmosférica de conter vapor de água. Portanto, os frutos devem ser armazenados a menor temperatura dentro do limite possível para retardar ao máximo a deterioração e perda de água. Entretanto, deve ser observada a faixa tolerável pelo fruto para evitar danos causados pelo frio (KADER, 2002a). Medições das taxas respiratórias de bananas (na faixa de 10 °C a 30 °C) mostram que à medida que a temperatura aumenta, a respiração progride mais rapidamente, deteriorando com mais intensidade a qualidade dos frutos (BHANDE; RAVINDRA; GOSWAMI, 2008). Em mangas armazenadas em diferentes condições ambientais, numa faixa de 5 °C a 30 °C, temperaturas mais altas resultam em taxas de deterioração maiores (RAVINDRA; GOSWAMI, 2008). Sendo assim frutos mantidos em refrigeração têm um potencial de vida útil mais prolongado em relação àqueles mantidos nas condições ambientais.

Outros fatores ambientais como concentrações de gases oxigênio (O₂), dióxido de carbono (CO₂) e etileno também têm grande influência sobre as taxas de deterioração. O primeiro deles, o O₂, é fundamental na respiração aeróbica e uma diminuição em sua concentração resulta em diminuição das taxas de reações nas quais ele está envolvido (CASTELLANOS; HERRERA, 2015). Por outro lado, acréscimos nas concentrações de CO₂, produzido na oxidação de substratos da respiração, retardam o processo de amadurecimento. Concentrações de CO₂ a partir de 1% na atmosfera ao redor dos frutos proporciona diminuição da intensidade respiratória (WATADA; KO; MINOTT, 1996). E não menos importante, o etileno é um hormônio sintetizado naturalmente nas plantas que participa do processo de amadurecimento. É produzido pelo metabolismo dos frutos climatérios e não climatérios, apesar de ser produzido em quantidades menores por esses últimos (WU, 2010). Com o intuito de reduzir os efeitos desses gases e prolongar a vida útil de alguns produtos, muitos estudos vêm sendo feitos em direção ao desenvolvimento de embalagens com atmosfera modificada (AM). Essas embalagens normalmente oferecem ao produto concentrações reduzidas de oxigênio e em muitos casos concentrações elevadas de CO₂ e pesquisas recentes comprovam seus efeitos positivos. No caso de goiabas estocadas a 17 °C em AM, os frutos tiveram sua vida útil estendida de 17 para 28 dias em comparação com

aqueles que não contavam com a proteção dessas embalagens (CASTELLANOS; POLANÍA; HERRERA, 2016). Em outro estudo os autores avaliaram a utilização de embalagens de AM para reduzir as taxas respiratórias de uvas da variedade 'Red Globe'. Nessa pesquisa, as embalagens utilizadas possuíam capacidade seletiva à permeabilidade de gases, gerando uma atmosfera favorável à manutenção da vida útil dos cachos. Os autores concluíram que a utilização das embalagens foi benéfica ao manter a qualidade pós-colheita da ráquis, reduzindo a deterioração da coloração verde (SILVA-SANZANA et al., 2016). Em mais um trabalho com uvas, embaladas em atmosfera com alta concentração de CO₂ (acima de 10 kPa), os frutos apresentaram menor incidência de deterioração por *Botrytis* após 8 semanas de armazenamento à 1 °C. No entanto, a alta concentração de gás carbônico acelerou o processo de escurecimento da ráquis (CRISOSTO; GARNER; CRISOSTO, 2002).

Além dos fatores ambientais mencionados, a concentração atmosférica de vapor de água tem grande influência sobre a perda de água dos frutos. Frutos frescos estão continuamente perdendo vapor de água para a atmosfera por transpiração (MAGUIRE; BANKS; OPARA, 2001). Devido a isso, é recomendado que a umidade relativa do ar seja mantida em aproximadamente 85-95% (ALFEREZ; ALFRED; BURNS, 2005). Redução excessiva da umidade resulta em aparência ressecada, murchamento, alterações de textura e sabor, tornando o produto inaceitável. A transferência de água é primordialmente resultante da diferença de pressão de vapor do ar que preenche os espaços intercelulares do vegetal e do ar no ambiente ao seu redor. O ar que preenche o interior do fruto está em uma condição aproximadamente saturada (100% de UR), logo, sua pressão de vapor é fortemente determinada pela temperatura (THOMPSON, 2002). O autor citado trabalha um exemplo no qual maçãs, mesmo estando em um ambiente saturado, i.e., 100% de UR (0 °C, pressão de vapor: 0,61 kPa) perdem água, enquanto sua superfície está mais quente que o ar (20 °C, pressão de vapor: 2,34 kPa). Como previsto por Thompson (2002), experimentos com uvas da variedade 'Superior' mostram que em ambientes com altas pressões de vapor de água (98-99% de UR) os cachos continuam a perder água. Além disso, há um aumento considerável na taxa de perda de massa inicial a 20 °C se comparada com o mesmo parâmetro a 10 °C, considerando as mesmas condições de umidade relativa (LICHTER et al., 2011). Portanto, todos os fatores ambientais tais como temperatura, concentrações gasosas e umidade relativa devem ser controlados ou, no mínimo, monitorados (dependendo de sua criticidade) a fim de minimizar a deterioração da qualidade dos frutos. Logo, produtores preocupados com a qualidade de sua produção devem lançar mão de ferramentas capazes de lhes auxiliarem a entender e estimar o impacto das condições de exposição sobre o produto final. Uma destas

ferramentas são os modelos preditivos que estimam alterações de parâmetros de qualidade em função das condições de exposição.

3.2 Modelos preditivos

Os modelos preditivos são utilizados para elucidar fenômenos físico-químicos e/ou microbiológicos, estimando tendências futuras para um determinado comportamento. A modelagem pode estar baseada apenas nos resultados empíricos, de maneira que o modelo construído tenha um viés estatístico da interpretação de dados, ou pode utilizar os conceitos dos chamados modelos orientados para o processo. Estes últimos são fortemente embasados em leis fundamentais da natureza e buscam interpretar fenômenos reais dentro de modelos conceituais. Decompondo processos complexos em sub processos mais simples, modelos orientados chegam às bases fenomenológicas do problema (HILLS, 2001; SLOOF; EVEREST, 2001).

O objetivo maior da modelagem é prever mudanças em propriedades de um alimento em função do tempo e das condições ambientais (LABUZA, 1984). Logo, o seu propósito é prover informações sobre o *status* do produto ajudando a decidir se são aptos ao uso do consumidor final (HERTOG et al., 2015). Para que essas estimativas sejam úteis, devem ser considerados os potenciais mecanismos de deterioração de qualidade, condições de exposição ambiental (e.g. temperatura, UR e luz), o tipo de embalagem utilizada (e.g. permeável ou semipermeável) e a cinética das reações envolvidas na degradação. Entretanto, há limitações intrínsecas a modelagem, i.e., a complexidade de alguns mecanismos de reações químicas, que levam a mudanças na qualidade observada, impede que algumas delas sejam isoladas e avaliadas separadamente, ou até mesmo impossibilita a formulação de modelos matemáticos. Assim, é razoável que se faça simplificações, considerando os mecanismos predominantes e excluindo os fatores desprezíveis. Labuza (1982) explica que a perda de qualidade para a maioria dos alimentos pode ser representada pela taxa de mudança de uma propriedade geral “A” em função do tempo. Na representação dessa propriedade, um sinal negativo é utilizado para indicar deterioração da qualidade como a diminuição de “A”. Por outro lado, um sinal positivo é utilizado caso a produção do mesmo indique a formação de um produto indesejado (Equação 1):

$$\pm \frac{dA}{dt} = kA^n \quad (1)$$

Em que k é uma constante que depende da temperatura e atividade de água e n é um parâmetro de ajuste de curva chamado de ordem de reação o qual define se a taxa é dependente da quantidade de “A” presente.

Obviamente a Equação 1 ignora o real mecanismo de reação que pode acontecer em uma série de passos complexos. No entanto, sua aplicação é muito útil para um ponto de vista prático (LABUZA, 1984). Um exemplo para a sua aplicação é no crescimento/mortalidade de microrganismos, no qual a sua utilização implica nas considerações de que a reação no sentido reverso é desprezível, as concentrações de outras espécies diferentes de “A” não são limitantes e as condições como pH, atividade de água (a_w), temperatura e potencial de redução são constantes. Logo, a equação cinética obtida é específica, i.e., para um sistema em particular estudado e em condições restritas. Assim, os modelos preditivos são apenas uma aproximação da realidade, sendo os mesmos uma interpretação dos dados referentes ao fenômeno observado (TIJSKENS; POLDERDIJK, 1996).

Sendo assim, modelos que estimam a vida útil de um alimento o fazem tomando como base um atributo que primeiro o torne inaceitável ao consumidor. Sob o conceito de qualidade intrínseca, no qual a qualidade perceptível está relacionada com propriedades internas do produto, a aceitabilidade do consumidor pode ser modelada de maneira mais objetiva, excluindo-se fatores externos como expectativas de compra, preço e ambiente mercadológico (SLOOF; TIJSKENS; WILKINSON, 1996; TIJSKENS; SCHOUTEN, 2009).

Segundo Taoukis e Giannakouros (2004), muitas reações responsáveis pela degradação da qualidade aceitável, baseada em índices físico-químicos, químicos ou microbiológicos, têm sido classificadas como ordem zero (e.g. qualidade global de alimentos congelados, reação de Maillard) ou ordem um (e.g. degradação de vitaminas, oxidação de pigmentos, crescimento microbiano). Assim, ao integrar a equação diferencial, entre “ A_0 ” (qualidade inicial) e “A” (qualidade no instante t), para condições ambientais constantes do tempo zero à “ t ”, tem-se as Equações 2, 3 e 4 para as ordens de reação zero, um e n , respectivamente.

Ordem zero:

$$A = A_0 - kt \quad (2)$$

Ordem um:

$$A = A_0 e^{-kt} \quad (3)$$

Ordem n (n≠1):

$$A = A_0 + [(n - 1)kt]^{\frac{1}{1-n}} \quad (4)$$

Na prática, o que essas equações indicam é que para as reações de ordem zero a variação na propriedade “A” (perda de qualidade) em função do tempo segue um perfil linear. Já para reações de ordem um, a taxa de variação nessa propriedade é representada por um decréscimo exponencial que depende diretamente da quantidade de “A” remanescente (TAOUKIS; GIANNAKOUREU, 2004). No entanto, isso não quer dizer que a vida útil de alimentos que se deterioram sob a ação de reações de ordem um seja maior que as de ordem zero (LABUZA, 1982). O autor exemplifica a afirmação comparando a taxa de decaimento da qualidade para níveis de até 50% da qualidade inicial, a diferença entre as ordens é mínima. Assim, se o fim da vida útil é estabelecido em menos de 50% do decaimento possível em determinado atributo de qualidade, faz pouca diferença se o mecanismo é considerado como de primeira ordem ou ordem zero. Em suma, quanto menor a mudança requerida para atingir o fim da aceitabilidade do produto, menor é a importância de saber-se exatamente qual o valor da ordem de reação.

No entanto, alguns autores recentemente utilizaram outras ordens de reação na modelagem do decaimento em atributos de qualidade. Um exemplo é o estudo da alteração em características sensoriais e nutricionais de melões minimamente processados (AMODIO; DEROSI; COLELLI, 2013). Nesse trabalho os autores testaram modelos convencionais, i.e. ordens zero e um, comparados com o modelo de Weibull (VAN BOEKEL, 2002). O objetivo era investigar a cinética de degradação dos atributos de qualidade mais relevantes. Obtendo coeficientes de regressão sempre acima de 0,95, os autores concluíram que o modelo Weibulliano foi o mais preciso em descrever alterações na aparência, translucidez, aroma constituintes químicos. Em outro trabalho onde foi avaliada a cinética de degradação da qualidade em folhas de rúcula fresca (AMODIO et al., 2015), os autores concluíram sobre a adequabilidade do modelo de Weibull em comparação com os modelos convencionais. Especialmente onde há um histórico não isotérmico associado à conservação do produto, esse modelo pôde introduzir um modelo log-logístico para a dependência da temperatura em seus parâmetros. Assim, apresentou-se uma alternativa à abordagem de Arrhenius, a qual considera

que as reações químicas relevantes podem ser caracterizadas por uma única energia de ativação.

A relação proposta por Arrhenius (1889 apud TAOUKIS; GIANNAKOUROU, 2004), como originalmente formulada, é derivada de leis fundamentais da termodinâmica e de princípios estatísticos. Essa lei, desenvolvida teoricamente para reações moleculares reversíveis, tem sido utilizada para descrever o efeito da temperatura sobre a taxa de muitas reações relacionadas à queda de qualidade (Equação 5):

$$k = k_0 e^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (5)$$

em que k_0 é uma constante de reação inicial, E_a é a energia de ativação da reação (J mol^{-1}), i.e. a barreira energética que o parâmetro de qualidade “A” precisa exceder para dar início ao processo de degradação, R é a constante universal dos gases ($8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$) e T é a temperatura (K).

No entanto, a correlação de Arrhenius implica que k_0 é o valor da constante de reação à 0 K, o que na prática não é de muito interesse. Taoukis e Giannakourou (2004) recomendam a utilização de uma temperatura de referência, T_{ref} , a qual corresponde a um valor representativo dentro do intervalo de interesse de estudo e k_{ref} é a taxa de reação correspondente a esta. Assim, a Equação 5 é transformada na Equação 6:

$$k = k_{ref} e^{-\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right)} \quad (6)$$

Portanto, supondo-se condições ambientais constantes e supondo uma reação de degradação de ordem zero, as equações 2 e 6 podem ser combinadas na Equação 7:

$$A = A_0 - \left[k_{ref} e^{-\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right)} \right] t \quad (7)$$

Essa combinação de equações tem sido muito aplicada no estudo do declínio de qualidade em muitos alimentos. Alguns exemplos são os estudos com degradação da cor verde em brócolis (DUARTE-SIERRA; CORCUFF; ARUL, 2016), deterioração por fungos em morangos (HERTOG et al., 1999), alteração de coloração verde em pepinos (SCHOUTEN; TIJSKENS; VAN KOOTEN, 2002) ou taxas respiratórias de maçãs, chicórias e tomates (HERTOG et al., 1998). A propriedade genérica “A” pode ser interpretada como sendo a limitante da vida útil de um produto. Em se tratando de frutas e hortaliças, cada espécie tem propriedades particulares que refletem as alterações de qualidade. Propriedades

que são de fácil medição, representativas ao longo da vida útil e afetadas pelas condições de estocagem são as que merecem ser investigadas (CASTELLANOS; HERRERA, 2015).

Em alguns produtos, a vida útil é limitada por questões de segurança do alimento. Logo, a chamada microbiologia preditiva é uma ferramenta útil para estimar o crescimento microbiano no interior e na superfície de alguns alimentos. Vegetais minimamente processados, devido às operações de processamento e manipulação pós-colheita, são mais susceptíveis às contaminações de microrganismos do que os vegetais integrais (CORBO; DEL NOBILE; SINIGAGLIA, 2006; RICO et al., 2007). No estudo de Corbo et. al. (2006) os autores utilizaram uma modificação na Equação de Gompertz para estimar a vida útil de alface, erva-doce e cenoura minimamente processadas. Com a modificação proposta, os autores identificaram vantagens ao estimar a influência das variáveis de processamento na cinética de queda de qualidade desses produtos. Em outro estudo, agora com contaminação de morangos pelo fungo *Botrytis*, os autores utilizaram um modelo do tipo Michaelis-Menten (Equação 8) para descrever a troca gasosa e estimar seus efeitos sobre vida útil de morangos embalados em AM. O modelo foi parametrizado em função das concentrações de O₂, CO₂ e temperatura (HERTOG et al., 1999):

$$\frac{dN}{dt} = Rel_{MR} \cdot k_s \cdot N \cdot \left(\frac{N_{max} - N}{N_{max}} \right) \quad (8)$$

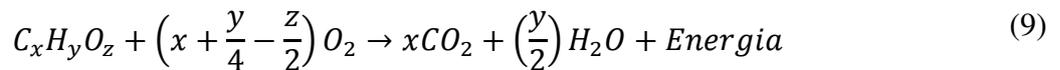
onde N é a porcentagem de morangos afetados, N_{max} é a porcentagem máxima de morangos afetados (100%), k_s é taxa de crescimento dos fungos deteriorantes (relacionada à temperatura pela expressão de Arrhenius) e Rel_{MR} é um termo referente a taxa metabólica relativa, a qual inclui a expressão para produção de CO₂ baseada em Michaleis-Menten.

Os autores identificaram que, apesar da complexidade na interação entre patógeno e hospedeiro ser mais complexa que o proposto, a abordagem utilizada conduziu a um modelo aplicável. Entretanto, nesse último trabalho, a qualidade dos morangos foi avaliada visualmente pela contagem do número de frutos visivelmente afetados por *Botrytis* e expressa como uma porcentagem do número total de unidades presentes na embalagem, sugerindo que o crescimento desses fungos deteriorantes pode ser facilmente identificado pelos consumidores no momento da decisão de compra. De fato, frutas e hortaliças integrais não são consideradas de alto risco microbiológico, já que normalmente elas se tornam completamente indesejáveis para consumo bem antes de microrganismos patogênicos ou toxinas se desenvolverem (AKED, 2000). Portanto, o tempo de vida útil desses produtos é fortemente

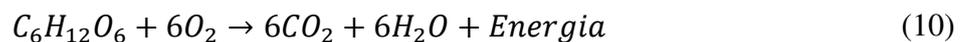
afetado pelos processos metabólicos que degradam seus aspectos físico-químicos e sensoriais. Dentre estes, um que merece destaque é o processo respiratório.

3.2.1 Respiração

A respiração é um processo metabólico que fornece ao fruto a energia necessária à manutenção de suas atividades vitais (CASTELLANOS; HERRERA, 2015). É descrito pela oxidação de compostos orgânicos como gordura, ácidos, álcoois e carboidratos. Sua cinética geral é dada pela Equação 9:



A queima de reserva energética do vegetal durante a respiração significa a aceleração da senescência do fruto. Quando as reservas estão exauridas ocorre redução do valor nutricional, sabor e aroma (principalmente o sabor doce) e redução do peso do vegetal. Além disso, quanto maior a taxa de respiração dos produtos pós-colheita mais perecíveis eles são (KADER, 2002a). No caso de frutas, o principal composto orgânico consumido na respiração são os açúcares frutose e glicose, os quais são gerados internamente pela quebra de carboidratos de cadeia maior. Sendo essas moléculas formadas por cadeias de seis carbonos, a Equação 9 se transforma na Equação 10:



Como é indicada pela Equação 9, a proporção entre o O_2 consumido e o CO_2 gerado é uma função do composto oxidado na reação. Na reação acima, ocorre a oxidação completa da molécula, logo a proporção entre os gases consumido e gerado é igual a um. Para a oxidação de outros compostos, e.g. ácidos orgânicos, a quantidade de CO_2 produzido é maior do que a de O_2 consumido. Pelo exposto, o quociente respiratório (QR) é definido como a razão entre a quantidade CO_2 produzido e a de O_2 consumido, com valores que variam de 0,7 a 1,3 para a maioria dos vegetais (KADER, 1986). Uma das limitações da modelagem preditiva de taxas respiratórias é que em muitos trabalhos só estão disponíveis as taxas de produção de gás carbônico ou a de consumo de oxigênio, dessa maneira os autores consideram o QR sendo unitário. Logo, se o QR real é maior, isto significa que a taxa real de produção CO_2 está sendo subestimada, do contrário se o quociente for menor do que o unitário a produção de CO_2 estaria sendo superestimada (FONSECA; OLIVEIRA; BRECHT, 2002).

Fatores internos que afetam a respiração de produtos vegetais são variedade do fruto, estágio de maturação, células danificadas e até mesmo os diferentes órgãos da estrutura da planta, os quais possuem taxas respiratórias diferenciadas (DÍAZ-PÉREZ, 1998). A temperatura é identificada como o fator externo mais importante e as concentrações de CO₂ e de O₂ são fatores cruciais para as taxas respiratórias. Devido a sua complexidade e ao grande número de variáveis envolvidas nas reações enzimáticas, a modelagem incluindo todas elas se torna muito difícil ou quase impossível. Uma estratégia comum empregada pelos pesquisadores é desenvolver modelos empíricos em função das variáveis controladas, principalmente a temperatura e concentrações gasosas (FONSECA; OLIVEIRA; BRECHT, 2002). Esse foi o caso de um estudo desenvolvido com abacaxi minimamente processado no qual os autores propuseram um modelo (Equação 11) de queda exponencial para a taxa respiratória (FINNEGAN et al., 2013):

$$R_{CO_2} = R_{CO_2}^{eq} + (R_{CO_2}^i - R_{CO_2}^{eq})e^{-\alpha t} \quad (11)$$

em que R_{CO_2} é a taxa respiratória em função do tempo (ml CO₂ kg⁻¹ h⁻¹), $R_{CO_2}^{eq}$ é a taxa respiratória no tempo de equilíbrio (ml CO₂ kg⁻¹ h⁻¹), $R_{CO_2}^i$ é a taxa respiratória inicial (ml CO₂ kg⁻¹ h⁻¹), t é o tempo de estocagem (h) e α é um coeficiente constante.

Finnegan et al. (2013) identificaram que a taxa respiratória decresce com o tempo de estocagem e que a idade fisiológica a afeta grandemente. Entretanto, esse tipo de modelo não diz nada sobre o mecanismo envolvido na respiração além de ser muito restrito (como outros modelos empíricos) ao sistema estudado.

Como alternativa, modelos baseados no mecanismo de Michaelis-Menten (Equação 12) têm sido utilizados para descrever o efeito de O₂ e CO₂ no processo de respiração (MAHAJAN; GOSWAMI, 2001). Nessa publicação, os autores propõem um modelo baseado na cinética das reações enzimáticas (mecanismo não competitivo) e na relação de Arrhenius para prever a taxa respiratória de maçãs:

$$R_{CO_2} = \frac{R_{CO_2}^{max} y_{CO_2}}{k_m + \left(1 + \frac{y_{CO_2}}{k_i(CO_2)}\right) y_{O_2}} \quad (12)$$

onde R_{CO_2} e $R_{CO_2}^{max}$ são a taxa de respiração e a taxa de respiração máxima (ml CO₂ kg⁻¹ h⁻¹), respectivamente, y_{CO_2} e y_{O_2} são as concentrações gasosas de O₂ e CO₂, respectivamente, k_m e

$k_{i(\text{CO}_2)}$ são as constantes de Michaelis-Menten para a evolução de CO_2 e inibição da evolução de CO_2 , respectivamente.

No ajuste do modelo, vários experimentos foram montados e utilizados para obter os parâmetros do fator pré-exponencial e energia de ativação da Equação de Arrhenius, válidos para a faixa de 0 a 30 °C. Os autores concluíram que as taxas de respiração previstas pelo modelo foram coerentes com aquelas obtidas experimentalmente. Essa descrição mais fundamentalista permite que os resultados obtidos sejam extrapolados para situações semelhantes.

3.2.2 Alterações de firmeza e cor

Firmeza e coloração são os principais atributos de qualidade avaliados por consumidores e revendedores em produtos hortícolas. Isso não quer dizer que outros atributos (e.g. teor de açúcar, teor de ácidos, sabor, aroma) não sejam importantes. Entretanto, por serem mensuráveis de maneira relativamente mais simples, esses dois atributos são usualmente utilizados no processo decisório de compra (TIJSKENS; SCHOUTEN, 2009). Portanto, a modelagem das propriedades relacionadas a estes parâmetros vem sendo largamente estudada.

À medida que a idade fisiológica do fruto progride e os subprodutos do metabolismo se acumulam, ocorrem alterações na sua textura como o amolecimento. A textura atinge seu valor mínimo quando o vegetal chega a senescência (CASTELLANOS; HERRERA, 2015). O amolecimento ou perda de firmeza podem ser atribuídos principalmente a fatores bioquímicos como a degradação da pectina por ação enzimática (GWANPUA et al., 2013) e alterações de propriedades das paredes celulares (DE SMEDT et al., 2002) ou a fatores biofísicos como a redução de turgor celular, devido principalmente à perda de água (SCHOUTEN et al., 2007a). Uma abordagem usual para a firmeza (F) é que ela é composta por duas partes (Equação 13), sendo uma delas fixa (F_{fix}) e atribuída a estruturas que não sofrem degradação ou que são quebradas muito lentamente (e.g. celulose e hemicelulose) e outra parte é variável (F_{var}) estando associado aos compostos que são degradados por ação enzimática (e.g. pectina) ou a perda de água para o meio ambiente (SCHOUTEN et al., 2007b):

$$F = F_{fix} + F_{var} \quad (13)$$

Em termos matemáticos, a firmeza fixa não sofre alteração no período pós-colheita, já o termo da firmeza variável é considerado como dependente da degradação da pectina. De uma forma geral, a reação de degradação da pectina (P) é catalisada por ação enzimática (Enz) em uma reação simples e irreversível (Equação 14), a qual resulta na produção de (G) ácido galacturônico (GWANPUA et al., 2013; TIJSKENS; SCHOUTEN, 2009):



Apesar da relação entre a firmeza e a concentração de pectina ser mais complexa e dependente da estrutura da pectina, para propósitos de modelagem, ela pode ser considerada linear, conforme descrito na Equação 15 (GWANPUA et al., 2012):

$$F = F_{fix} + \gamma[P] \quad (15)$$

onde $[P]$ é a concentração de pectina e γ é um fator de conversão que relaciona a firmeza à quantidade de pectina não hidrolisada.

A presença de etileno (Eth) afeta diretamente a concentração de enzimas pécicas (E_{pect}), sendo essa relação explicada de maneira simplificada pela conversão de aminoácidos precursores (E_{pre}) através de reação cinética de primeira ordem, mostrada na Equação 16 (GWANPUA et al., 2012):



Para alguns autores a geração de etileno não é influenciada pela respiração, sendo sua emissão fortemente dependente da temperatura e suavemente dependente das concentrações de O_2 e CO_2 (GENARD; GOUBLE, 2005). Sugerindo então que a respiração em frutos climatérios pode não ser requisito para o amadurecimento. Por outro lado, outros autores trabalharam com modelos onde a parte variável da firmeza é descrita por uma reação cinética de primeira ordem (Equação 17) e dependente da respiração e concentrações gasosas. Nesse modelo, a firmeza aparente (F) é afetada por uma reação de conversão simples irreversível com velocidade dada pela constante de reação (k). F_0 é a firmeza inicial no momento de colheita, t é o tempo de estocagem e F_{eq} é chamada de firmeza de equilíbrio em um tempo “ t ” infinito (HERTOG; NICHOLSON; JEFFERY, 2004):

$$F = F_{eq} + (F_0 - F_{eq})e^{-kt} \quad (17)$$

Os autores propõem também que a constante de reação k esteja relacionada com a temperatura e concentrações gasosas por um modelo de Michaelis-Menten de inibição não competitiva. Eles concluíram que o modelo desenvolvido mostrou ser genérico e viável para prever a qualidade.

Quanto às mudanças na coloração de frutas, estas são o indicador mais evidente do estágio de maturação (WILLS et al., 2007). A coloração é gerada por compostos pigmentos como clorofila, feofitina, licopeno e antocianina pela reflexão ou absorção da luz incidente como observada pelos olhos humanos (TIJSKENS; SCHOUTEN, 2009). Como ponderado pelos autores, mudanças na cor observada podem ser causadas por alterações na incidência de luz, aspectos subjetivos da percepção ou no conteúdo de pigmentos. No entanto, para fins práticos de modelagem do comportamento da qualidade do produto, a percepção e incidência de luz devem ser consideradas constantes enquanto o conteúdo de pigmentos é o objeto de estudo.

A maioria dos vegetais é verde em alguma etapa do seu desenvolvimento, portanto o conteúdo de clorofila é um bom ponto de referência. Esse composto é degradado pela ação de três enzimas, as quais são: clorofilase, feoforbida alfa oxidase (PAO) e *red chlorophyll catabolite reductase* (HÖRTENSTEINER, 2006). Outros pigmentos, como as antocianinas, são produtos do metabolismo secundário e se desenvolvem ao longo da maturação (e.g. uva, maçã, framboesa). Seu desenvolvimento é dependente da quantidade de precursores e da sua proporção de conversão. A variação de antocianinas e clorofila pode ser representada, de maneira simplificada, pelas Equações 18 e 19, respectivamente, representando reações de primeira ordem (SCHOUTEN et al., 2002; SCHOUTEN; TIJSKENS; VAN KOOTEN, 2002):

$$\frac{dred}{dt} = k_r \cdot prec \quad (18)$$

$$\frac{dCHL}{dt} = k_{fw}chl - k_{bw}CHL \quad (19)$$

onde *red*, *prec*, *chl* e *CHL* são as concentrações de antocianinas, precursores, clorofilidas e clorofinas, respectivamente, k_r , k_{fw} e k_{bw} são as constantes de reação para formação de antocianinas, formação de clorofilida, e degradação da clorofila, respectivamente.

O comportamento das cores é mais comumente expresso pelo sistema $L^*a^*b^*$ representado em um espaço tridimensional, onde a coordenada L^* representa luminosidade ou claridade e está no eixo vertical, com valores entre 100, para a cor branca, a zero, cor negra. Nos outros dois eixos estão as coordenadas a^* e b^* , as quais não possuem valores numéricos limitados. Valores positivos para a^* representam o vermelho e os negativos representam o verde. Similarmente, valores positivos de b^* representam o amarelo e os negativos a cor azul (CASTELLANOS; HERRERA, 2015; TIJSKENS; SCHOUTEN, 2009). Em estudo sobre a cinética da mudança de cor em brócolis estocado em refrigeração, os autores identificaram que o comportamento da coordenada b^* e a^* podem ser representados por modelo exponencial de primeira ordem (Equação 20) e polinomial de segunda ordem (Equação 21), respectivamente (REN et al., 2006). Já em trabalhos que avaliaram as alterações na coloração da casca em duas variedades de bananas (CASTELLANOS; ALGECIRA, 2012; CHEN; RAMASWAMY, 2002), os autores concluíram que as coordenadas L^* , a^* e b^* seriam mais bem descritas por modelo logístico (Equação 22), ordem zero (Equação 23) e primeira ordem (Equação 20), respectivamente:

$$b = b_0 e^{(-k_b t)} \quad (20)$$

$$a = c_1 t^2 + c_2 t + c_3 \quad (21)$$

$$L = U_0 + \frac{U}{1 + e^{(-k_L(t-t_{1/2}))}} \quad (22)$$

$$a = a_0 + k_a t \quad (23)$$

onde b_0 e a_0 são os valores no início da estocagem, k_b , k_L e k_a são as constantes dependentes da temperatura e concentração gasosa para cada coordenada, U_0 e U são constantes relacionadas ao valor inicial de L e ao valor de L no tempo de equilíbrio, respectivamente, c_1 , c_2 e c_3 são constantes específicas relacionadas ao frutos e condições de estocagem, t é o tempo de estocagem e $t_{1/2}$ é o tempo necessário para que L decaia à metade do valor de equilíbrio.

3.2.3 Taxa de transpiração e perda de massa

O percentual relativo de perda de massa é geralmente utilizado para descrever o frescor de vegetais (SHIBAIRO; UPADHYAYA; TOIVONEN, 2002). Dentre os fatores que resultam em redução da massa inicial, a desidratação por transpiração está entre os mais relevantes. Esse processo de perda de água em frutas frescas envolve a difusão de água do

interior das células para o espaço intercelular até que um nível de saturação seja atingido. Em seguida ocorre a vaporização dessa água dos espaços intercelulares para a atmosfera através da casca (NGCOBO et al., 2012). A perda de água por um tecido vegetal por unidade de tempo é chamada de taxa de transpiração (TT ; Equação 24) e pode ser inicialmente expressa em função da sua perda de massa (LEONARDI; BAILLE; GUICHARD, 1999):

$$TT = \frac{M_0 - M}{t(M_0/1000)} \quad (24)$$

em que TT é a taxa de transpiração ($\text{g kg}^{-1} \text{h}^{-1}$), t é o tempo (h), M_i e M são a massa inicial e a massa do fruto no tempo t (g), respectivamente.

Os fatores que provocam a desidratação e conseqüente perda de massa em frutos frescos podem ser características próprias do produto como calor de respiração, formato, tamanho, área de superfícies do fruto, estágio de maturação e estrutura celular da casca ou externos como a diferença de pressão de vapor ou a velocidade do ar (KADER, 2002a). A abordagem clássica utilizada por muitos pesquisadores para a perda de água, em uma determinada condição ambiental, baseia-se na solução para o estado estacionário da primeira lei de Fick (Equação 25), onde há uma relação linear entre a taxa de transpiração, a diferença da pressão de saturação e a pressão de vapor do ar (SASTRY; BUFFINGTON, 1983):

$$\dot{T}T = k_t(p_s - p_v) \quad (25)$$

em que $\dot{T}T$ é a taxa de transpiração do fruto por unidade de área por unidade de tempo, k_t é o coeficiente de transpiração por unidade de área (considerado constante), p_s e p_v são a pressão de saturação e a pressão de vapor do ar, respectivamente.

Na abordagem utilizada na Equação 25, a transferência de água do interior do fruto para o meio ambiente que o cerca se dá pela difusão de vapor de água (presente no espaço intercelular do fruto) através da casca. Considerando uma camada de ar imediatamente adjacente à casca do fruto como sendo um filme estagnado (de velocidade igual à zero), pode-se atribuir o fenômeno de transferência de massa de água inteiramente à difusão.

No coeficiente de transpiração (k_t) estão considerados os fatores internos que influenciam a taxa de transpiração. No entanto, apesar de esses fatores poderem ser interpretados como um único coeficiente, alguns autores o explicitam como a área de superfície do fruto e a permeabilidade efetiva da casca ao vapor de água (MAGUIRE; BANKS; OPARA, 2001). Mas de fato, esses dois últimos podem ser vistos como parâmetros

muito específicos de cada sistema estudado, podendo variar de indivíduo para indivíduo. Logo, a interpretação de ambos como um único termo é mais interessante de um ponto de vista prático.

Assim, o fluxo de água através da superfície da fruta para o meio ambiente é proporcional à diferença de pressão de vapor entre a atmosfera interna do fruto e a do meio ambiente, comportamento que obedece a lei de Fick (MAHAJAN; OLIVEIRA; MACEDO, 2008; SOUSA-GALLAGHER; MAHAJAN; MEZDAD, 2013). Uma consideração essencial feita na aplicação desse conceito é a de que na atmosfera do interior do fruto a pressão parcial de vapor de água é muito próxima à de saturação (MAGUIRE; BANKS; OPARA, 2001). Dessa maneira, a pressão de vapor na superfície será fortemente influenciada pela sua temperatura. Na publicação de Mahajan; Oliveira; Macedo (2008) sobre a taxa de transpiração de cogumelos, os autores desenvolveram um modelo (Equação 26) no qual a taxa de transpiração é proporcional à diferença entre a atividade de água média da fruta e a atividade de água do ar (UR/100) e ao efeito da temperatura. Todas as considerações acerca da abordagem do fenômeno de transferência de massa baseado na lei de Fick, mencionadas anteriormente, foram utilizadas nesse modelo:

$$TT = k_t(a_w - a_{w_{at}})(1 - e^{-bT}) \quad (26)$$

onde TT é a taxa de transpiração ($\text{g kg}^{-1} \text{h}^{-1}$), k_t é o coeficiente de transpiração do fruto ($\text{g kg}^{-1} \text{h}^{-1}$), $a_{w_{at}}$ e a_w são a atividade de água do ar ambiente e a atividade de água média dos frutos, respectivamente, T é a temperatura ($^{\circ}\text{C}$) e b é uma constante de correlação estimada ($^{\circ}\text{C}^{-1}$).

Dessa maneira Mahajan; Oliveira; Macedo (2008) aplicaram o modelo para prever a transpiração em cogumelos e concluíram que o mesmo descreveu adequadamente a perda de massa desses frutos. Em outra publicação, Sousa-Gallagher; Mahajan; Mezdad (2013) utilizaram a Equação 26 combinada com a Equação 24 para prever a massa de morangos armazenados em condições controladas (Equação 27). Os autores observaram que o peso predito estava em concordância com os valores obtidos experimentalmente, portanto, a abordagem utilizada foi adequada para descrever o fenômeno. Posteriormente o modelo foi validado com morangos armazenados em T e UR diferentes das utilizadas na parametrização do modelo, e mais uma vez, houve concordância entre valores previstos e experimentais:

$$M = M_0 - k_t(a_w - a_{w_{at}})(1 - e^{-bT})(M_0/1000)t \quad (27)$$

Alternativamente o tema foi abordado por uma ótica diferente, na qual o fenômeno de perda de água é analisado por um modelo (Equação 28) que se baseia em uma reação de equilíbrio químico de primeira ordem para descrever o processo difusivo da transpiração (TIJSKENS et al., 2010). Existe uma diferença conceitual entre a abordagem clássica e a de Tijskens et al. (2008). Na primeira, a taxa de transpiração depende do tamanho, área superficial e resistência da casca do fruto ao vapor de água. Implicitamente é considerada uma uniformidade no tecido abaixo da barreira entre o fruto e o ambiente (casca). Dessa forma, teoricamente, a quantidade de água disponível para a transpiração é igual à massa do fruto. Na interpretação utilizada pelos autores o potencial de perda de água é limitado e diferente da massa total do fruto. Logo, uma fração do fruto é matéria seca e não estará envolvida no processo de transferência de água. Além do mais, a água ligada (e.g. moléculas envolvidas pelas membranas celulares) estará menos disponível para a transpiração:

$$\Delta M = M_p(e^{k_t t} - 1) \quad (28)$$

onde ΔM é a variação de massa (kg), M_p é um parâmetro referente ao potencial de redução da umidade do fruto (kg), k_t é a constante de transpiração (h^{-1}) e t é o tempo (h).

Nessa linha de raciocínio, a constante de transpiração (k_t) é a mesma para todos os frutos individuais independente do tamanho, área ou espessura da casca. No parâmetro (M_p) estão considerados o efeito dos fatores externos, i.e., temperatura e UR, a quantidade inicial de água livre, quantidade de água fixa e outras características internas referentes à morfologia dos frutos (e.g. rugosidade da casca, estrutura do pedúnculo, estrutura da cutícula). Apesar dos autores terem concluído sobre a aplicabilidade da abordagem utilizada no desenvolvimento do modelo, obtendo bons coeficientes de determinação ($R_{\text{ajd}}^2 > 0,95$) nos testes de validação, o fator M_p ainda é estimado por regressão como um único parâmetro e a maneira de converter os fatores externos (temperatura e UR) explicitamente dentro dessa linha de raciocínio é desconhecida. Uma tentativa de agregar os fatores ambientais, utilizando essa abordagem, foi feita em estudo para desenvolver e validar um modelo para estimar perdas pós-colheita de tomates durante transporte pela África ocidental (VENUS et al., 2013). Nesse trabalho os autores incluíram o termo de perda de água em um modelo preditivo para a alteração de textura em função das condições de temperatura e UR variáveis, transformando o parâmetro M_p em uma função linear da umidade relativa monitorada dentro dos caminhões, os autores obtiveram relativo êxito na aplicação da estratégia. No entanto, eles afirmaram que estudos futuros são necessários para que seja possível incluir outros fatores externos (e.g.

danos mecânicos) no modelo, os quais seriam capazes de explicar parte da variância não explicada (23%).

3.3 Qualidade de uvas de mesa

A uva (*Vitis Vinifera L.*), pertence à família *Vitaceae*, é cultivada em muitos países do mundo. De acordo com as informações fornecidas pela Organização Internacional da Vinha e do Vinho (OIV) a produção mundial atingiu 7,57 milhões de toneladas no ano de 2015 com uma área cultivada de 7,5 milhões de hectares de vinhedos, sendo a Espanha (1021 kha) o maior produtor mundial, seguida de perto pela China (830 kha) onde se localiza agora a segunda maior área coberta por vinhedos do mundo. O Brasil ocupa a décima sexta posição, possuindo uma área de vinhedos de 85 kha (OIV, 2016).

Em sua estrutura, as bagas (frutos) são compostas por polpa parcialmente translúcida enclausurada por uma casca fina, algumas delas possuem sementes comestíveis enquanto outras são variedades sem sementes. A cor dos frutos é devida à presença de pigmentos poli fenólicos, os quais estão presentes de acordo com a cor característica do cultivar. Bagas vermelhas ou roxas são ricas em antocianinas ao passo que bagas verdes são ricas em taninos. Estes compostos são antioxidantes e se encontram principalmente na casca (BROUILLARD; CHASSAING; FOUGEROUSSE, 2003; WATHERHOUSE, 2002). Segundo a *Food and Agriculture Organization* (MENCARELLI; BELLINCONTRO; DIRENZO, 2005) a composição nutricional das uvas é formada majoritariamente por 80% de água, aproximadamente 15% de açúcares, 1,5% de fibras, 0,5% de proteínas e 0,1% de lipídeos. São frutos não climatérios que possuem baixas taxas de atividade fisiológica, no entanto estão muito sujeitas à severa perda de água e infecções fúngicas. Escurecimento da ráquis (problema também conhecido como desidratação do engaço) e o mofo cinzento, causado pelo fungo *Botrytis cinerea*, são os dois principais fatores na redução da qualidade pós-colheita de uvas de mesa (CRISOSTO et al., 1994). Anualmente, os desperdícios na produção de uvas são estimados em 50% do total produzido, o que resulta em menor suprimento da fruta e em último caso provoca o aumento do custo dessa commodity (SONKER; PANDEY; SINGH, 2016).

O armazenamento em climas quentes e úmidos é prejudicial à qualidade do fruto devido ao favorecimento de várias infecções (e.g. *Aspergillus niger*, *A. flavus*, *A. terreus*, *A. ochraceus*, *Alternaria alternata*, *Botrytis cinerea*, *Colletotrichum gloeosporioides*, *Cladosporium sp.*), as quais reduzem não apenas o valor nutricional dos frutos, mas também produzem riscos adicionais em forma de micotoxinas. Com o intuito de proteger as uvas das

infecções pós-colheita e aumentar o sua vida útil e valor comercial, se torna essencial o controle de doenças (SONKER; PANDEY; SINGH, 2016). Como mencionado por Sonker; Pandey; Singh (2016), frequentemente o controle dessas doenças é obtido pelo tratamento com água quente e tratamentos térmicos (WU et al., 2015) e também por fungicidas químicos. No entanto, os métodos físicos e químicos têm suas próprias limitações. Atualmente, níveis aceitáveis de controle de infecções têm sido obtidos com tecnologias envolvendo o uso de dióxido de enxofre (SO₂). Como por exemplo, as almofadas geradoras de SO₂ que são aplicadas dentro das embalagens e utilizadas comercialmente pelo mundo todo. Nessas almofadas, gás SO₂ é liberado após a reação do metabisulfito de sódio com o vapor de água do ar ambiente (PALOU et al., 2002).

Importantes problemas derivados da utilização de SO₂ em uvas de mesa, como a percepção pública sobre o tema, já que o composto é nocivo à saúde humana e ao meio ambiente, e a falta de novos fungicidas menos perigosos tem motivado a busca por estratégias alternativas. Assim, o uso de produtos biologicamente ativos a base de plantas tem sido estudado por conta de sua eficácia na proteção de produtos perecíveis. Dentre estes, o uso de produtos naturais como extratos de plantas (XU et al., 2007), óleos essenciais (SHAHI et al., 2003), quitosana (GAO; ZHU; ZHANG, 2013) e a integração desses produtos com outros métodos como a atmosfera modificada (SILVA-SANZANA et al., 2016) ou controlada (CRISOSTO; GARNER; CRISOSTO, 2002) têm demonstrado bons resultados e provado serem úteis no prolongamento da vida útil pós-colheita.

A qualidade de uvas de mesa se refere a uma gama de atributos sensoriais relacionados à aparência, cor, textura, sabor e aroma. Sua evolução atinge o nível máximo no estágio ótimo de maturação imediatamente após a colheita. No caso de armazenagem por longos períodos a baixas temperaturas, tem sido reportado que os atributos de qualidade físico-químicos internos e externos mais importantes de uvas de mesa não são significativamente afetados pela exposição ao etileno (PALOU et al., 2003).

A cor da casca e a firmeza são importantes atributos de qualidade para a sua aceitação pelo consumidor final. Apesar da degradação da clorofila e acumulação de antocianinas (frutos vermelhos e roxos) ou carotenoides (frutos amarelos e verdes) ocorrer apenas nas fases de maturação, esses compostos têm um importante papel como componentes funcionais benéficos para a saúde do consumidor. Na maturação também ocorre a diminuição de firmeza das bagas graças à atividade de várias enzimas que alteram a estrutura das paredes celulares e diminuem a adesão das mesmas (NUNAN et al., 1998). Simultaneamente, está ocorrendo a acumulação de açúcares e a diminuição do nível de ácidos orgânicos, o que

confere às bagas maduras um bom balanço entre dulçor/acidez em termos de odor, sabor e aroma global.

O parâmetro mais frequentemente utilizado para avaliar a qualidade interna de uvas é o teor de sólidos solúveis (TSS) e a acidez titulável (AT, percentual de ácido tartárico). A razão entre esses dois valores, comumente conhecida como índice de maturação (IM), é muitas vezes utilizada para propósitos comerciais como critério de qualidade para colher os frutos e os negociar no mercado (PALOU et al., 2010).

Em trabalho com uvas da variedade 'Kyoho' armazenadas em refrigeradores domésticos, sujeitos às flutuações de temperatura, os autores identificaram que a velocidade de deterioração dos atributos internos de qualidade (sabor, odor e textura) foi maior do que a de atributos externos (cor e aspecto visual). Logo, a aceitabilidade global desses frutos estaria muito mais ligada aos três aspectos internos do que à aparência (MA et al., 2016). No entanto, essa pesquisa foi realizada com frutos recém-colhidos e transportados o mais rapidamente possível para as condições de refrigeração. Levando-se em consideração situações reais de distribuição do produto, a redução de qualidade nos aspectos de aparência do fruto, ocorrida entre a colheita dos cachos e o momento de decisão de compra do consumidor, pode fazer com que o produto seja rejeitado antes mesmo de os atributos internos poderem ser apreciados.

A perda de água é um fator primordial na diminuição do peso vendável dos frutos e proporciona aspecto ressecado e murcho aos cachos. Ela ocorre principalmente na estocagem à temperatura e UR ambientes (e.g. no ponto de venda), os quais criam grande diferença de pressão de vapor (DPV) entre a superfície do fruto e o ar. No entanto, o ressecamento dos cachos também ocorre durante o armazenamento refrigerado (LICHTER et al., 2011; ROSALES et al., 2013). Para uvas em geral, perdas de massa da ordem de 5%, em relação à massa inicial, são o suficiente para que sintomas visíveis de ressecamento das bagas sejam notados (CRISOSTO; MITCHELL, 2002; NELSON, 1978). Além disso, a desidratação e escurecimento da ráquis são problemas significativos para na redução da qualidade global dos cachos, reduzindo o seu potencial de mercado, e ocorrem, para algumas variedades, a partir de perdas de massa de apenas 2 a 3% da massa inicial (BALIC et al., 2012; CRISOSTO; SMILANICK; DOKOOZLIAN, 2001). No entanto, devido ao grande número de fatores que influenciam a qualidade percebida de produtos vegetais frescos, como as uvas de mesa, frequentemente a interpretação de seu valor de mercado fica sujeita às especificações e controles pessoais estabelecidos por algumas indústrias e companhias.

Com o objetivo de promover uma linguagem comum entre produtores, distribuidores e comerciários, existem os chamados *grade standards* (padrões de qualidade), os quais identificam o grau de qualidade de uma commodity. Esse grau de qualidade acordado é utilizado como a sua base de valor e usabilidade. A padronização proporciona benefícios como ajudar produtores e manipuladores a melhorar a preparação e rotulagem de produtos frescos para o mercado, prover uma base para incentivar melhores pagamentos por melhor qualidade, além de servir como base para o mercado reportar cotação de preços para produtos de qualidade comparável em diferentes mercados (KADER, 2002b).

O *United States Department of Agriculture* (USDA) e a *European Economic Commission* (EEC) estabelecem padrões de qualidade para a comercialização de uvas de mesa (EEC, 2011; USDA, 1999). Além do estágio de maturação (determinado pelo TSS) típico de cada variedade, as exigências quanto à qualidade dos cachos de uvas estão fortemente ligadas ao seu aspecto visual. Cor, uniformidade, tamanho das bagas, ausência de bagas ressecadas, partidas ou murchas são alguns dos itens explicitamente exigidos por ambas as agências reguladoras do mercado americano e europeu. Principalmente no que se refere à aparência firme e não ressecada das bagas e a aparência não quebradiça e coloração verde-amarela da ráquis, a redução da umidade dos cachos tem um importante papel em estudos relacionados à deterioração desses atributos de qualidade. Já que temperatura e UR afetam diretamente a desidratação em frutas (como exposto no item 3.2.3), a manutenção dessas condições ambientais reflete diretamente em maior ou menor qualidade desses produtos.

Evidentemente, em um âmbito comercial a aceitabilidade de uvas de mesa está fortemente ligada ao seu histórico de conservação. Assim, ferramentas como os modelos preditivos, que sejam capazes de processar dados coletados na cadeia de distribuição e gerar informações sobre o seu impacto na qualidade das frutas, são valiosas para abordar a solução do problema. No entanto, os trabalhos sobre a aplicação de modelos preditivos de qualidade na cadeia do frio de uvas são escassos. Em um destes, a difusividade de água através da ráquis de uvas de mesa durante a estocagem em baixas temperaturas foi estudada. Os autores utilizaram modelos empíricos para descrever a cinética de desidratação em diferentes partes da ráquis (NGCOBO et al., 2013), comprovando o potencial dos modelos matemáticos para avaliar e prever a qualidade de uvas de mesa, porém nesse caso, apenas o engajo (ou ráquis) foi o objeto de estudo.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Uvas

Uvas da variedade ‘Crimson Seedless’ foram colhidas nas datas de 02-09-16 e 24-10-16 em estágio de maturação comercial (17,8% e 20,5% TSS, respectivamente), preparadas e embaladas em fazendas na cidade de Petrolina, Pernambuco, Brasil e transportadas em caminhões refrigerados até um centro distribuidor de frutas em Jundiaí, São Paulo, Brasil.

Uvas do cultivar ‘Niagara’ (14,3% TSS) foram colhidas no dia 26-10-16 em Jales, São Paulo, Brasil e transportadas até o mesmo distribuidor regional em Jundiaí, São Paulo, Brasil, onde foram preparadas, embaladas e armazenadas em ambientes refrigerados.

Durante a preparação no *packing house*, os cachos de ambas as variedades foram inspecionados e divididos em bandejas com tampa, feitas de plástico rígido tipo PET (185x115x90 mm) com peso nominal de 500 g. Os frutos recém-chegados das fazendas foram adquiridos no centro distribuidor de frutas (Mape Frutas Agroindústria, Jundiaí, São Paulo, Brasil) em unidades comerciais (caixas com dez bandejas e recobertas por filme plástico, Figura 1), sendo transportados dentro de uma hora até o Laboratório de Controle e Automação de Processos em Alimentos da Universidade Estadual de Campinas.

As embalagens foram pesadas em balança analítica (AM5500, Marte Balanças e Aparelhos de Precisão, Brasil, com precisão de 0,01 g) e a média de peso inicial das bandejas foi $548,3 \pm 14,2$ g e $539,1 \pm 10,9$ g para as uvas ‘Crimson Seedless’ e ‘Niagara’, respectivamente.

Figura 1 - Uvas ‘Crimson Seedless’ obtidas em distribuidor local de frutas.



Fonte: Elaborada pelo autor

4.2 Procedimento experimental

O mesmo procedimento experimental foi aplicado para os dois cultivares, e todos os experimentos foram realizados em triplicata. As embalagens foram divididas, logo após as medições do peso inicial em cinco ambientes de temperatura controlada aproximadamente constante (Tabela 1). Refrigeradores equipados com controladores de temperatura (N323TR, Novus Produtos Eletrônicos Ltda., Brasil) foram utilizados para proporcionar as faixas de temperatura desejadas.

Durante o período de testes (29 dias), houve o monitoramento das condições ambientais de exposição dos frutos (Tabela 1). A temperatura do ar foi monitorada por termorresistências Pt100 (CRZ-2005, Novus Produtos Eletrônicos Ltda., Brasil) e a UR foi monitorada por transmissores de umidade e temperatura (RHT-WM, Novus Produtos Eletrônicos Ltda., Brasil). A temperatura da superfície de alguns frutos também foi monitorada utilizando as termorresistências Pt100, para a avaliação da proximidade à temperatura do ambiente. Durante o período de experimento a medição de peso das embalagens, armazenadas em temperaturas específicas e controladas, foi realizada periodicamente para avaliação da perda de massa e tratamento de dados experimentais para posterior parametrização dos modelos preditivos. O espaçamento entre as medições foi de dois a três dias (dias 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 19, 21, 23, 25, 27 e 29), pois como

comprovado por Ngcobo et al. (2012), o processo de perda de água em uvas pode ser relativamente lento.

Tabela 1 – Condições médias (\pm desvio padrão) de temperatura e umidade relativa de estocagem nos ambientes refrigerados.

Ambiente	Uvas ‘Crimson Seedless’		Uvas ‘Niagara’	
	Temp. (°C)	UR (%)	Temp. (°C)	UR (%)
1	2,5 \pm 1,6	45,9 \pm 6,4	2,3 \pm 1,7	49,5 \pm 12,1
2	5,7 \pm 1,7	43,8 \pm 4,6	5,5 \pm 1,0	51,2 \pm 9,4
3	11,0 \pm 1,4	54,2 \pm 9,9	10,1 \pm 0,9	50,0 \pm 10,1
4	15,1 \pm 1,1	66,2 \pm 4,5	16,4 \pm 0,5	65,0 \pm 5,0
5	25,1 \pm 2,0	45,3 \pm 8,9	25,0 \pm 2,0	47,9 \pm 8,9

Fonte: Dados da pesquisa

4.2.1 Simulação de tempos de espera

Além do monitoramento das condições ambientais, onde as embalagens foram armazenadas em ambientes de temperatura constante, foram criadas situações de tempo de espera para dar início à refrigeração (*cooling delays*). Três embalagens de cada variedade foram mantidas em condições ambientais de aproximadamente 25 °C e 45% de UR (ambiente 5, Tabela 1) por diferentes períodos de tempo (24, 48 e 72 horas), antes de serem transferidas para os ambientes de temperatura constante mais baixa e UR favorável.

Durante o período de realização dos testes de tempo de espera, as embalagens foram pesadas diariamente para que fosse realizado o acompanhamento da perda de massa e comparação da taxa de transpiração dos frutos dessas embalagens com a dos frutos armazenados em temperatura constante.

Um dos objetivos destes ensaios foi avaliar se os frutos que passaram por *cooling delays*, após serem transferidos para ambientes refrigerados apresentariam taxas de transpiração similares àquelas de frutos que ficaram inicialmente em refrigeração constante. Estas amostras também serviram para realização de testes de validação do modelo construído com os respectivos cenários de exposição de temperatura e UR. Visando obter as informações desejadas, os dados experimentais obtidos foram utilizados na Equação 24 (apresentada no item 3.2.3), e as taxas de transpiração (TT ; g de vapor de água $h^{-1} kg^{-1}$ de fruto) foram calculadas. Os cálculos foram realizados por regressão não linear utilizando o software Statistica (Statistica 7, Statsoft, Inc., EUA).

4.2.2 Testes de validação do modelo

Uma vez que a validação de modelos preditivos envolve a comparação dos resultados preditos a resultados observados em condições diferentes daquelas utilizadas para gerar o modelo (ROSS, 1996), triplicatas de cada variedade foram mantidas em refrigerador comum com flutuações convencionais de temperatura e UR (temperatura média 8.2 ± 1.5 °C e 5.1 ± 2.9 °C, nos testes com as uvas ‘Crimson Seedless’ e ‘Niagara’, respectivamente), para geração de histórico de condições de conservação variáveis. Durante o período de aproximadamente dezenove dias as condições de temperatura e UR foram registradas, minuto a minuto, e o peso das embalagens medido conforme frequência de pesagens aplicada a outras amostras em teste.

Alguns dos testes de *cooling delay* também foram utilizados como teste de validação. Os resultados experimentais para a perda de massa dos testes de 72 horas de espera de cada variedade foram utilizados para comparação com as previsões feitas pelo modelo.

4.2.3 Análises adicionais

Ao longo do período de testes amostras foram analisadas periodicamente quanto à AT (acidez titulável) e ao TSS (teor de sólidos solúveis). O teor de TSS foi medido utilizando refratômetro automático (r²i300, Reichert, Inc., EUA) e a AT foi analisada segundo metodologia do Instituto Adolfo Lutz (INSTITUTO ADOLFO LUTZ, 2008). Também foi registrada a atividade de água média dos frutos de cada variedade utilizando instrumento medidor (Aqualab Series 3TE, Decagon Devices, Inc., EUA).

4.3 Modelagem matemática

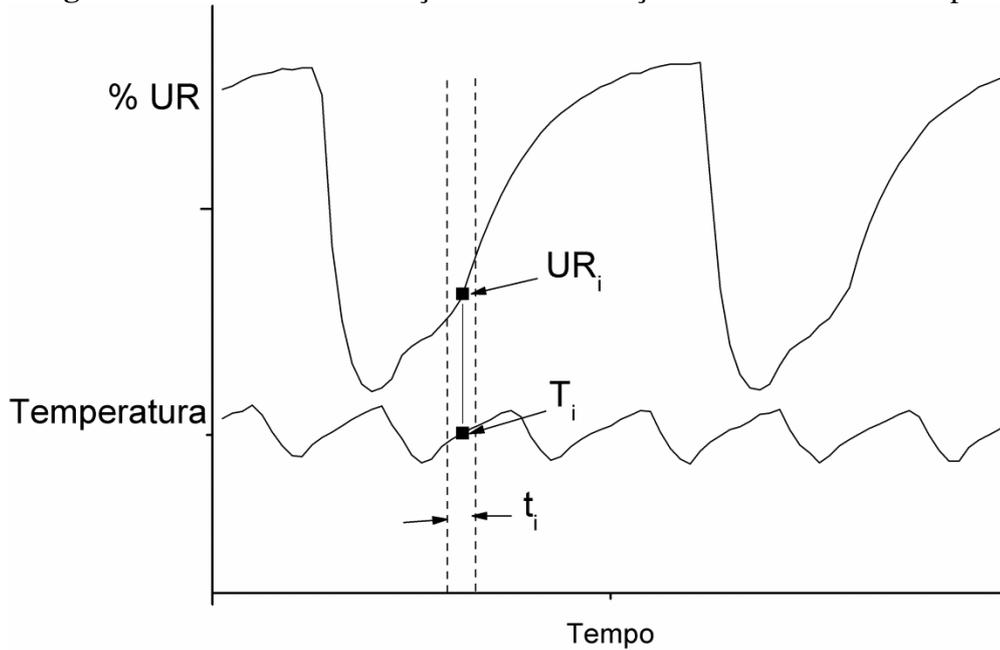
Como comprovado em trabalhos experimentais anteriores, a perda de massa em cachos de uva é causada principalmente pela perda de água (CRISOSTO et al., 1994; CRISOSTO; SMILANICK; DOKOOZLIAN, 2001; GENTRY; MITCHELL; NELSON, 1963; ROGIERS et al., 2004), a qual provoca danos na aparência das bagas e da ráquis, além de gerar prejuízos pela diminuição do peso vendável. A transferência de vapor de água do fruto para o ambiente é proporcional à diferença de pressão de vapor na superfície do fruto e a do ambiente que o cerca. Segundo Ben-Yehoshua (1987), a taxa de desidratação pode ser medida em termos da quantidade de água perdida pelo tecido vegetal por unidade de massa por unidade de tempo e é conhecida como taxa de transpiração (apud MAHAJAN; OLIVEIRA; MACEDO, 2008). Assim, a perda de massa medida em todos os ambientes experimentais montados foi considerada como sendo resultado da transpiração.

Os dados experimentais de transpiração dos cachos de uva obtidos nos diferentes ensaios com as diferentes combinações de temperatura (T) constante e UR monitoradas (Tabela 1) foram utilizados para estimar as constantes k_t ($\text{g h}^{-1} \text{g}^{-1}$) e b ($^{\circ}\text{C}^{-1}$) da Equação 27 (Tabela 2), válidos para as faixas de T e UR estudadas. O modelo (proposto pela Equação 27) foi ajustado aos dados experimentais por regressão não linear, utilizando o software Statistica (Statistica 7, Statsoft, Inc., EUA). A análise de variância dos resíduos e a correlação entre resultados observados e preditos também foram feitas utilizando o mesmo software.

Como definido por Maguire; Banks; Opara (2010) a perda de massa em frutas é muitas vezes expressa como uma porcentagem de sua massa inicial, logo esse percentual aumenta à medida que o peso total diminui. Entretanto, a diferença entre a massa inicial e a real em qualquer momento ($\Delta M_{(t)}$; %) é dada pela integração das taxas de perda de massa (k' ; $\% \text{ h}^{-1}$) durante o período pós-colheita. Logo, é possível representar essa perda de massa como uma função genérica (Equação 29), com a qual é possível calcular o total da variação de massa ocorrida em qualquer período em particular da vida pós-colheita (t) desde que as taxas em cada estágio sejam conhecidas:

$$\Delta M_{(t)} = \int_0^t k' dt \quad (29)$$

Assim, conhecendo-se o valor para as taxas de transpiração nos diferentes intervalos de tempo pode-se obter uma estimativa para a perda de massa acumulada. Dessa maneira, o modelo (Equação 27) parametrizado foi concebido para a aplicação em cenários de temperaturas constantes, sendo necessário adotar um método racional para a sua adaptação às situações em que estivessem disponíveis históricos de condições de conservação variáveis. Como argumenta Labuza (1982), dado um histórico das condições de conservação variáveis, o mesmo pode ser dividido em pequenos intervalos de tempo, nos quais as condições podem ser consideradas como constante (e.g. T_i e UR_i ; Figura 2). Neste pequeno intervalo, um fenômeno genérico dependente das condições ambientais, também ocorre a uma taxa constante. Analogamente, o mesmo procedimento pode ser adaptado para outras condições de conservação ambientais (e.g. umidade relativa).

Figura 2 - Histórico de condições de conservação variáveis versus tempo

Fonte: Adaptado de Labuza (1982)

No presente trabalho, o procedimento adotado para fazer a validação do modelo para um cenário de condições de conservação variáveis, T e UR, foi o mesmo sugerido por Labuza (1982). Fazendo a discretização do período de acompanhamento em pequenos intervalos de 1 minuto, onde T e UR medidas dentro desses pequenos intervalos foram consideradas constantes, então, a perda de massa calculada dos frutos foi dada pela massa inicial menos o somatório das perdas de massa nos “n” intervalos de tempo decorridos no período de monitoramento (Equação 30):

$$M = M_0 - \sum_0^{i=n} k_t (a_w - a_{wat(i)}) (1 - e^{-bT(i)}) (M_0/1000) t_i \quad (30)$$

onde M é a massa em função do tempo (g), M_0 a massa inicial (g), k_t o coeficiente de transferência de massa ($\text{g h}^{-1} \text{g}^{-1}$), $a_{wat(i)}$ a atividade de água do ambiente ($\text{UR}_{(i)}/100$), a_w atividade de água média medida dos frutos ($0,979 \pm 0,003$), b um coeficiente correlação ($^{\circ}\text{C}^{-1}$), $T_{(i)}$ é a temperatura ($^{\circ}\text{C}$) e t_i é o tempo (h).

O modelo discretizado foi utilizado para analisar o histórico de T e UR ocorrido para as uvas armazenadas em refrigerador comum com flutuação de temperatura e para os frutos submetidos à *cooling delays*. Uma consideração essencial feita na utilização desse modelo é a de que a temperatura do ar saturado que preenche os espaços intercelulares no interior do fruto é igual à temperatura do ar ambiente. Assim, os registros de temperaturas do ar dentro dos refrigeradores poderiam ser utilizados diretamente no modelo preditivo. Essa é

uma consideração adotada por outros autores (DE SMEDT et al., 2002; HERTOOG, 2002; LEONARDI; BAILLE; GUICHARD, 1999).

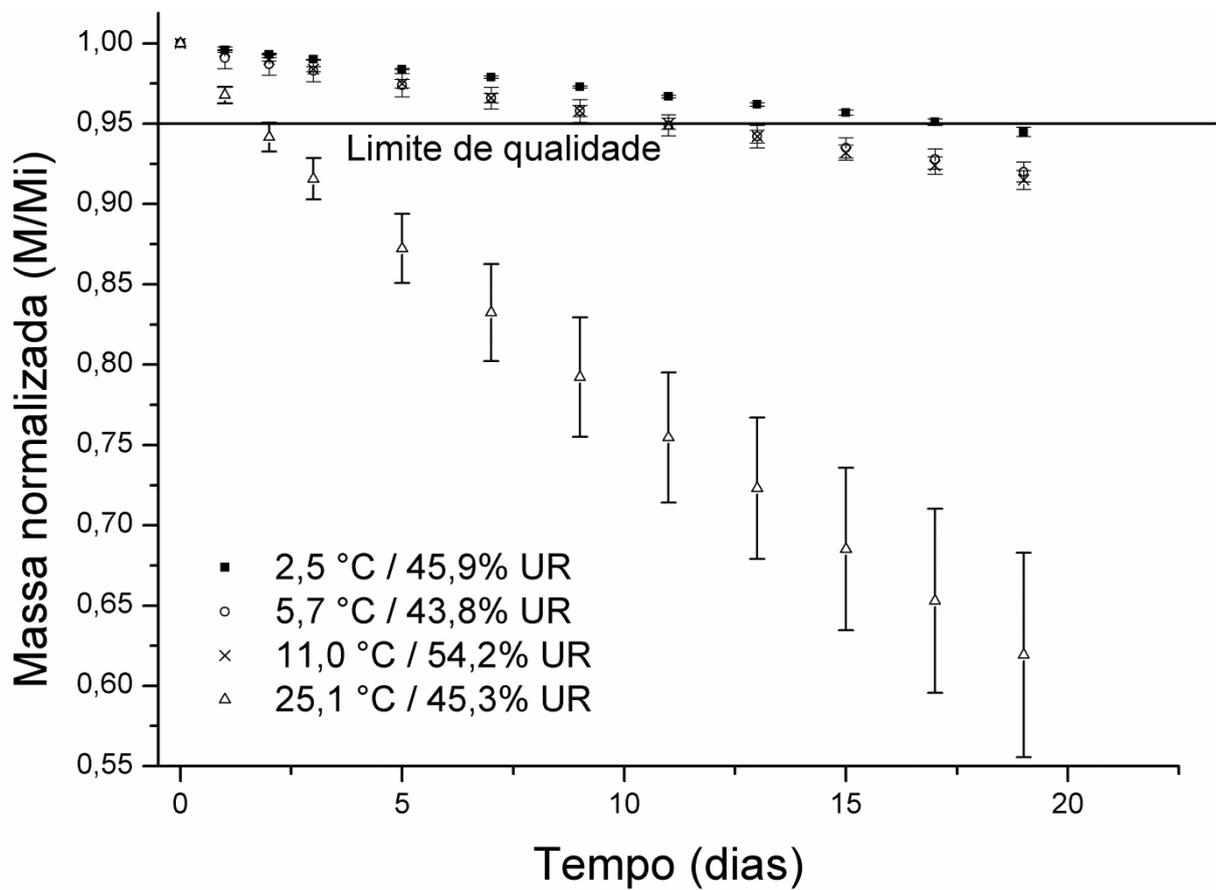
Apesar de publicações anteriores relatarem, que por causa do calor gerado pela respiração, a temperatura na superfície dos frutos é ligeiramente maior do que a do ar ambiente (AMOS, 1995; SASTRY; BUFFINGTON, 1983), foi montado um experimento no qual a temperatura de superfície do fruto e a temperatura do ar refrigerado foram monitorados por um período de aproximadamente 4 horas. O objetivo desse pequeno experimento foi testar a hipótese de que a temperatura do fruto pode ser considerada igual à temperatura do ar. Uma vez que, para aplicações em históricos térmicos reais (e.g. movimentação dos frutos pela cadeia do frio), as obtenções medidas de temperatura da superfície do fruto podem ser inviáveis e/ou imprecisas (devido às superfícies irregulares), essa consideração ($T_{\text{produto}} \cong T_{\text{ar}}$) é de grande utilidade.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Perda de massa das uvas nas temperaturas constantes

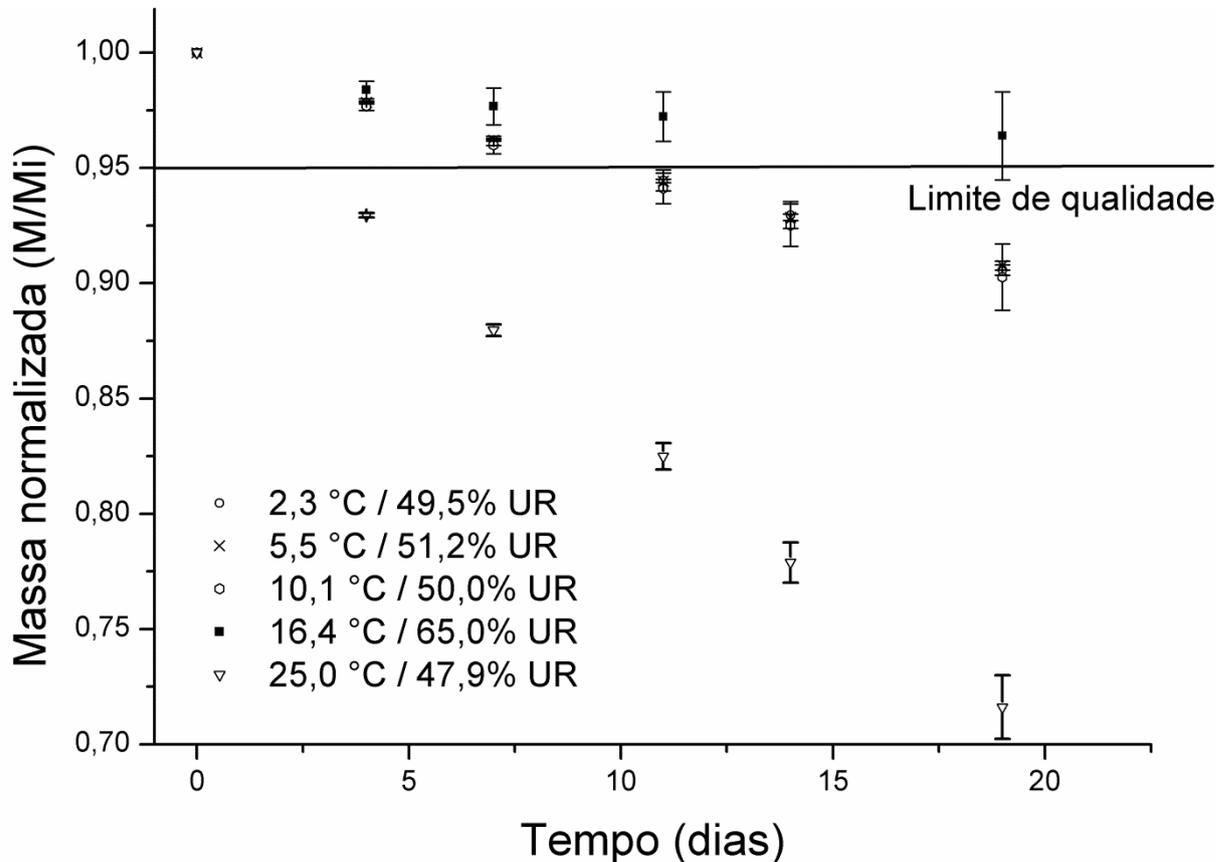
Nas Figuras 3 e 4 são apresentadas as diminuições das massas dos cachos de uvas ‘Crimson Seedless’ e ‘Niagara’, respectivamente, armazenados nos ambientes controlados descritos na Tabela 1, durante período de 19 dias. Cada ponto da curva é referente à média de três embalagens. Os desvios padrão estão indicados pelas barras de erro.

Figura 3 - Variação da massa de uvas ‘Crimson Seedless’ (M) armazenadas em temperaturas constantes. Os valores foram normalizados em relação a massa inicial (M_i).



Fonte: Dados da pesquisa

Figura 4 - Variação da massa de uvas ‘Niagara’ (M) armazenadas em temperaturas constantes. Os valores foram normalizados em relação a massa inicial (Mi)



Fonte: Dados da pesquisa

No caso das uvas ‘Crimson Seedless’ (Figura 3) dentre os ambientes refrigerados, a perda de massa foi maior para a temperatura de 11,0 °C e menor para a de 2,5 °C, i.e., temperaturas mais altas provocaram maior perda de massa dos cachos resultando em bagas ressecadas e engaços desidratados. No entanto, houve diferença não significativa (indicada pelo desvio das médias) entre as taxas de perda de massa para as uvas armazenadas nos ambientes a 5,7 °C e 11,0 °C, o que provavelmente pode ser explicado pelas UR não controladas em cada um deles. Uma vez que as uvas armazenadas em temperatura de $5,7 \pm 1,7$ °C ficaram expostas à UR média mais baixa ($43,8 \pm 4,6\%$), as uvas estocadas à de $11,0 \pm 1,4$ °C ficaram em ambiente com umidade relativa média mais alta ($54,2 \pm 9,9\%$).

Para as uvas da variedade ‘Niagara’ (Figura 4) a perda de massa foi maior no ambiente refrigerado a temperatura de 16,4 °C e menor para a de 2,3 °C. Como indicado pelos desvios, não houve diferença significativa entre as taxas de perda de peso nos ambientes de 2,3 °C, 5,5 °C e 16,4 °C.

Em pesquisas sobre as taxas de transpiração de frutas, Mahajan; Oliveira; Macedo (2008) e Sousa-Gallagher; Mahajan; Mezdad (2013) demonstraram que para um nível de

significância de 95% tanto a temperatura quanto a UR têm efeitos significativos sobre a taxa de transpiração desses produtos, como quantificado pela análise de Pareto. No entanto, para os dois casos houve um efeito um pouco mais pronunciado da UR, bem como efeito significativo da interação entre as duas variáveis. Esses resultados reforçam a recomendação sobre a manutenção de baixas temperaturas durante a estocagem de frutas frescas, sendo que para uvas o sugerido é que o produto seja resfriado para próximo de 0 °C (FOURIE, 2008; NELSON, 1978; SONKER; PANDEY; SINGH, 2016), bem como reforçam a recomendação de manutenção de alta UR (85 a 95%) para a estocagem de frutas (ALFEREZ; ALFRED; BURNS, 2005).

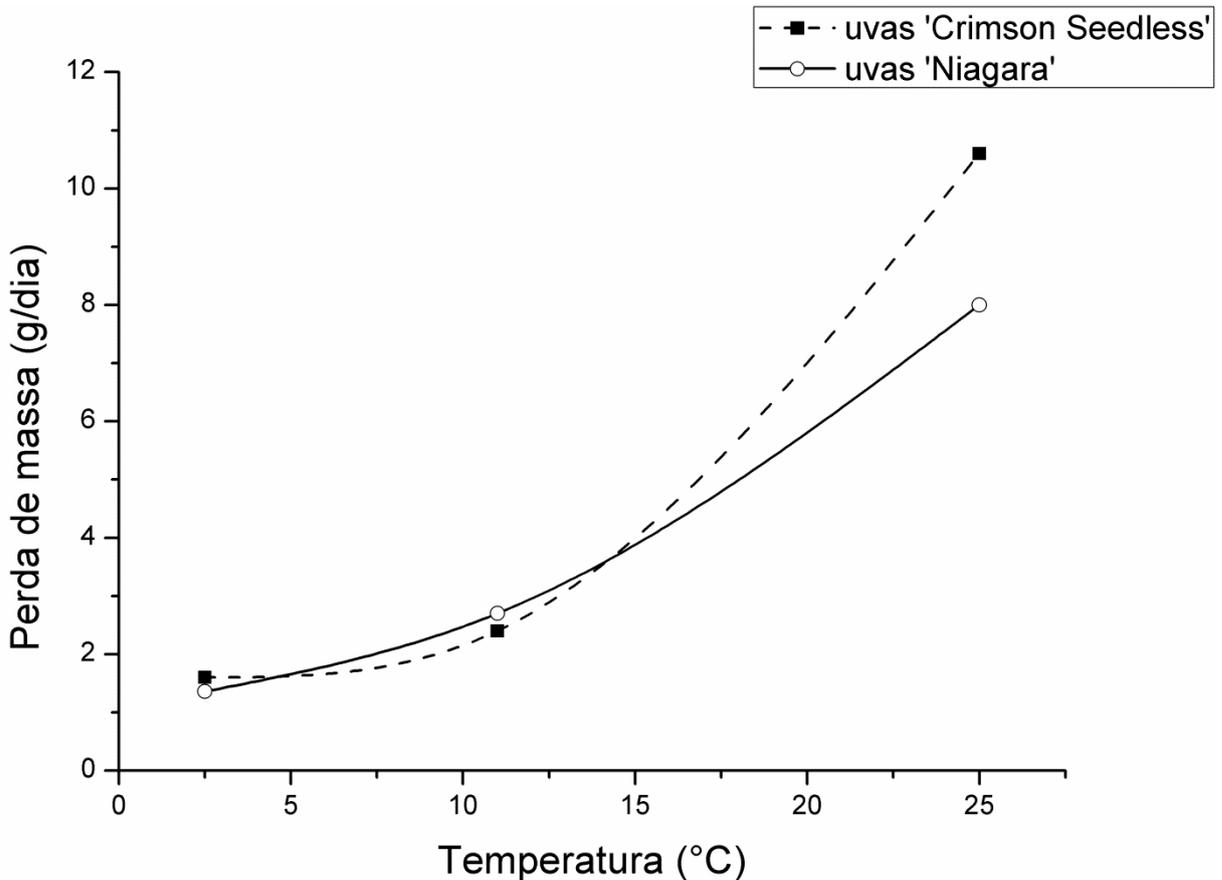
Um perfil aproximadamente linear de perda de massa foi observado em todos os ambientes, inclusive nas condições de alta temperatura e baixa umidade relativa (Ambiente 5; Tabela 1). Esses resultados estão em concordância com o estudo de Lichter et al. (2011), no qual os autores também observaram a linearidade no decréscimo de massa de cachos de uvas das variedades ‘Superior’ e ‘Thompson’, sugerindo que há uma relação de proporcionalidade direta entre a quantidade de massa perdida e o tempo de estocagem.

Para uma média de peso das embalagens de uvas ‘Crimson Seedless’ igual a 548,3 ± 14,2 g a perda de massa variou de 1,6 a 2,4 g/dia para as temperaturas controladas testadas durante as 456 horas de ensaio. Já para o ambiente de 25 °C e 45% de UR a perda de massa em uma base diária foi bem superior (10,6 g/dia), indicando que para patamares de temperatura e UR como os de um ambiente sem refrigeração, a redução da massa dos cachos ocorre mais rapidamente do que em ambientes refrigerados.

Para as embalagens de uvas ‘Niagara’ (539,1 ± 10,9 g) foram observados valores de 1,36 a 2,7 g/dia para a perda de massa durante um período similar de acompanhamento, aproximadamente 456 horas. A alta taxa de perda de massa também foi observada para os frutos estocados nas condições de não refrigeração (8,0 g/dia).

Na Figura 5 são mostradas graficamente as perdas de massa diárias em função das temperaturas de armazenamento. Considerando-se que a umidade relativa foi constante entre os ambientes controlados, variando dentro de uma faixa muito pequena, a perda de massa foi aproximada de uma função exclusivamente da temperatura, $f(T)$.

Figura 5 – Perda de massa diária versus temperatura em uvas ‘Crimson Seedless’ e ‘Niagara’ armazenadas em refrigeração constante.



Fonte: Dados da pesquisa

Os valores de TSS e AT das amostras armazenadas em ambientes de T constante, durante o período de amostragem, 456 h, tiveram variação de $\pm 1,6\%$ e $\pm 0,02$ g de ácido tartárico 100 g^{-1} de mosto, respectivamente, para as uvas ‘Crimson Seedless’ e $\pm 0,4\%$ e $\pm 0,04$ g de ácido tartárico 100 g^{-1} de mosto, respectivamente, nas uvas ‘Niagara’. Devido a estas pequenas variações, considerou-se uma alteração não significativa. Essa alteração é resultante da perda de água, i.e., maior concentração dos sólidos.

No primeiro ensaio com uvas ‘Crimson Seedless’, as amostras perderam cerca de $8,0 \pm 0,5\%$ de sua massa inicial após 29 dias de estocagem (Figura 5) à temperatura e umidade relativa médias de $2,5\text{ °C}$ e $44,6\%$, respectivamente, resultando em uma perda de massa bem menor que o obtido em experimento da literatura com a mesma variedade de uvas ($12 \pm 0,3\%$) estocadas a 1 °C e 95% de UR (VALVERDE et al., 2005).

Esse resultado reforça a grande influência da barreira proporcionada pelo material de embalagem. Enquanto no presente estudo os frutos foram armazenados em embalagens rígidas de PET com perfurações de diâmetros de aproximadamente $0,9\text{ cm}$, sendo que no

trabalho de Valverde et. al. (2005), os cachos não foram embalados, ficando mais susceptíveis a perda de água. A barreira proporcionada pelo material de embalagem cria um micro clima em seu interior, no qual a pressão de vapor do ar é maior do que no seu exterior.

A influência do material de embalagem sobre a taxa de transpiração dos cachos foi avaliada por Ngcobo et al. (2012). Nesse trabalho, os autores estudaram as características da perda de água em uvas de mesa embaladas em diferentes filmes plásticos. Eles observaram que os cachos que não contavam com a proteção de nenhum tipo de embalagem atingiram taxas de transpiração até três vezes maior do que cachos que foram embalados em filmes de polietileno de baixa densidade (LDPE) não perfurado. Isso se deveu ao fato de que esse tipo de filme manteve a UR no interior da embalagem próximo a 100%.

Resultados semelhantes foram comprovados por meio de simulação computacional, onde os autores utilizaram um modelo de fluido dinâmica computacional (CFD) para estudar as características de escoamento do ar, transferência de massa e calor dentro e fora de embalagens contendo cachos de uvas (DELELE et al., 2013). Nesse estudo os autores também comprovaram que filmes plásticos não perfurados produzem maior UR no ambiente interno da embalagem. Evidenciaram também maiores taxas de condensação decorrentes da utilização destes. No entanto, em ambas as publicações os autores relataram benefícios na utilização de filmes com pequenas perfurações, proporcionando menor DPV entre a atmosfera da embalagem e o ar ambiente. Logo, embalagens de PET utilizadas no estudo aqui relatado também tiveram efeito benéfico sobre a minimização das perdas de massa.

Como relatado na literatura, uma perda de massa de no máximo 5%, em relação a massa inicial, é considerado como o limite de qualidade aceitável para alguns produtos vegetais como maçãs (MAGUIRE; BANKS; OPARA, 2001), cogumelos (MAHAJAN; OLIVEIRA; MACEDO, 2008) e uvas (CRISOSTO; MITCHELL, 2002). Nos próximos tópicos são discutidos alguns resultados a cerca do caso específico das variedades de uvas estudadas no presente trabalho. No entanto, considerando-se o valor padrão (5%) para a redução de peso aceitável uvas, como reportado na literatura, na Figura 3 é mostrada uma linha contínua a qual demarca o “limite de qualidade”.

Levando em consideração esse valor, a vida útil de uvas ‘Crimson Seedless’ mantidas em refrigeração constante à, aproximadamente, 2,5 °C foi de 17 dias. Já para as uvas mantidas às temperaturas de 5,7 e 11,0 °C o tempo de vida útil foi de 11 dias. Para a temperatura de 25,1 °C o prazo de validade não ultrapassou os 2 dias. Já para as uvas da variedade ‘Niagara’ a temperatura de 2,3 °C manteve o produto dentro do limite aceitável de

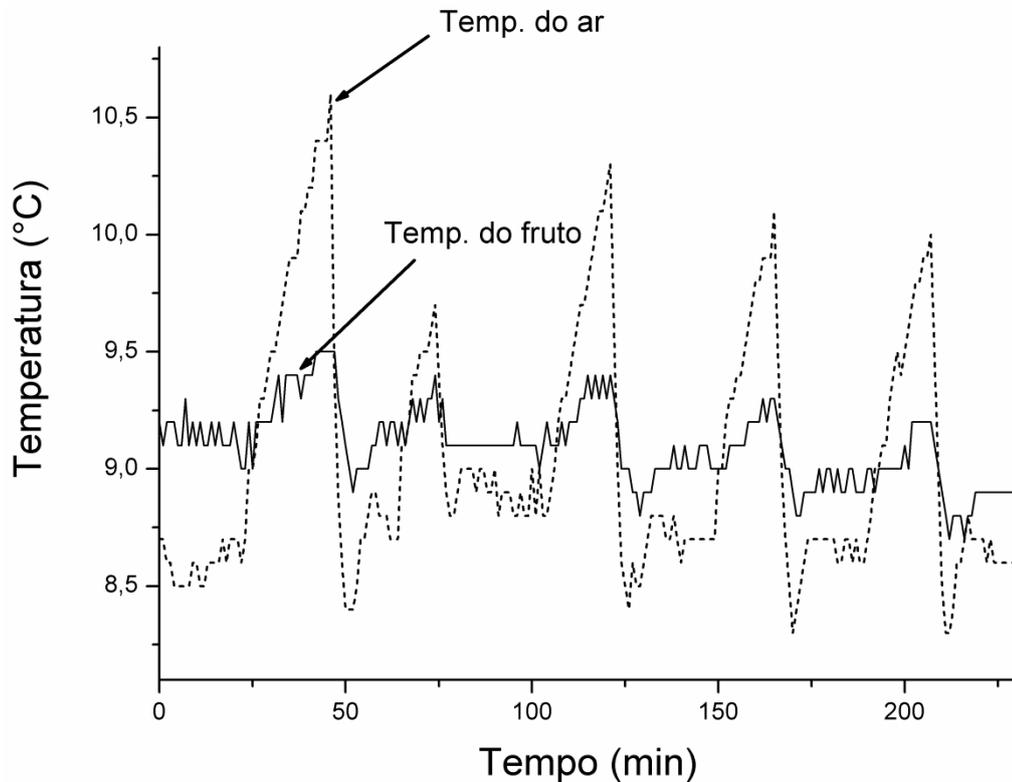
qualidade durante os 19 dias de experimento. Nas temperaturas de 5,5 °C, 10,1 °C e 16,4 °C o prazo de validade foi de cerca de 10 dias. Comprovando o efeito negativo das altas temperaturas sobre a qualidade do fruto, o prazo de validade dos frutos estocados a 25,0 °C foi de apenas 3 dias.

Os resultados reforçam a forte dependência existente entre a temperatura de armazenamento e o prazo de validade real da fruta e não necessariamente o prazo estipulado nas embalagens. Como argumentado por Labuza (1982), a extensão da vida pós-colheita depende do tipo de produto e das condições de exposição do ambiente no qual ele é mantido. Essa afirmação é especificamente verdadeira no caso de frutas. Como sugerido pelo autor, o prazo de validade rotulado em embalagens e etiquetas desse tipo de produtos não pode ser tomado como confiável ou definitivo caso nenhuma informação sobre o histórico de conservação esteja disponível.

5.1.1 Temperatura de superfície dos frutos

Na Figura 6, são mostradas as flutuações de temperatura do ar e da superfície de cachos de uva embalados e armazenados em refrigerador comum, por um período de aproximadamente quatro horas. Como podem ser observadas, as amplitudes dos valores medidos para a temperatura do ar são maiores do que as observadas nos frutos. Nesse exemplo a temperatura do ar varia entre 8,4 e 10,6 °C, ou seja, $9,5 \pm 1,1$ °C. Enquanto a da superfície do fruto varia entre 8,7 e 9,5 °C, ou seja, $9,1 \pm 0,4$ °C. No entanto, em situação de equilíbrio térmico essas duas temperaturas tendem a se igualar. Como registrado por Amos (1995) em estudo realizado com maçãs embaladas e armazenadas em ar refrigerado em equilíbrio térmico, a diferença entre as temperaturas do ar e da superfície do fruto foi de aproximadamente 0,5 °C. Como mencionado anteriormente, essa diferença se deve principalmente ao calor gerado na respiração. Sendo assim, a condição do modelo de utilizar a temperatura do ar, por aproximação, como sendo igual à temperatura do fruto é adequada.

Figura 6 - Flutuações de temperatura do ar e da superfície da uva armazenadas em refrigerador comum



5.2 Efeitos dos tempos de espera

A perda de massa das uvas durante os tempos de espera foi diretamente proporcional à duração dos mesmos, ambas as variedades de uvas foram mantidas à temperaturas de aproximadamente 25 °C e umidade relativa em torno de 45% durante os *cooling delays*. Na Tabela 2 são apresentadas as médias (\pm desvio padrão) de perda de peso para ambas as variedades de uvas em cada um dos tempos de espera testados. Uvas ‘Crimson Seedless’ perderam em média mais massa que as uvas da variedade ‘Niagara’. Esse resultado pode ser explicado pelo fato de a primeira variedade possuir uma casca menos espessa se comparada à segunda, logo oferece uma barreira menor à transferência de água, i.e., menor resistência. Um possível mecanismo para que isso aconteça é que as membranas celulares (casca do fruto) menos espessas induzem a maiores DPV no interior do vegetal. Um grande DPV maior força motriz para transferir a massa de água disponível no fruto através da epiderme, proporcionando maiores taxas de transpiração (TIJSKENS et al., 2010).

Tabela 2 – Percentual médio (\pm desvio padrão) de perda de massa em relação à massa inicial para as uvas ‘Crimson Seedless’ e ‘Niagara’ durante os diferentes tempos de espera (25 °C e 45% UR).

Variedade	Perda de massa (%)		
	24 horas	48 horas	72 horas
‘Crimson Seedless’	2,4 (\pm 0,5)	4,7 (\pm 1,0)	7,3 (\pm 1,6)
‘Niagara’	2,6 (\pm 0,6)	4,2 (\pm 0,2)	5,3 (\pm 0,3)

Fonte: Dados da pesquisa

Depois de os cachos terem sido expostos a temperaturas ambientais por períodos de tempo definidos, os mesmos foram transferidos para cada ambiente refrigerado, igualmente as outras amostras. Observou-se que, após os frutos terem sido transferidos para os ambientes refrigerados, a taxa de transpiração reduziu para patamares idênticos aos dos cachos armazenados sem tempo de espera nas respectivas temperaturas constantes (Figuras 7 e 8). A Figura 7 é referente às embalagens de uvas do cultivar ‘Crimson Seedless’ que passaram por diferentes tempos de espera (24, 48 e 72 horas) e depois desses períodos foram transferidas para um ambiente refrigerado ($2,5 \pm 1,6$ °C e $45,9 \pm 6,4\%$ de UR). No gráfico as perdas de massa são comparadas às de embalagens que foram colocadas em refrigeração sem tempo de espera, sendo que cada ponto da curva é referente à média de três embalagens de uvas. Na Figura 8 são mostrados os resultados para experimento semelhante, com uvas ‘Crimson Seedless’ que sofreram atrasos para o início da refrigeração (24, 48 e 72 horas) e ao término desses períodos foram armazenadas em temperatura aproximadamente constantes em outro ambiente refrigerado ($11,0 \pm 1,4$ °C e $54,2 \pm 9,9\%$ de UR). Como mencionado anteriormente, as taxas de transpiração (TT; $\text{g h}^{-1} \text{kg}^{-1}$) dos frutos foram calculadas e os seus valores comparados. Verificou-se pelo teste de Tukey, ao nível de significância de 5%, que as taxas de transpiração não diferem entre si para nenhum dos tratamentos. Depois de estocados a mesma temperatura os frutos que sofreram os tempos de espera transpiram à mesma taxa que os frutos que permaneceram sob refrigeração constante e sem o estresse inicial.

Figura 7 - Efeito dos diferentes tempos de espera sobre as taxas de transpiração (TT; $\text{g h}^{-1} \text{kg}^{-1}$) de uvas ‘Crimson Seedless’ durante armazenamento em refrigeração a $2,5 \pm 1,6$ °C e $45,9 \pm 6,4\%$ de UR

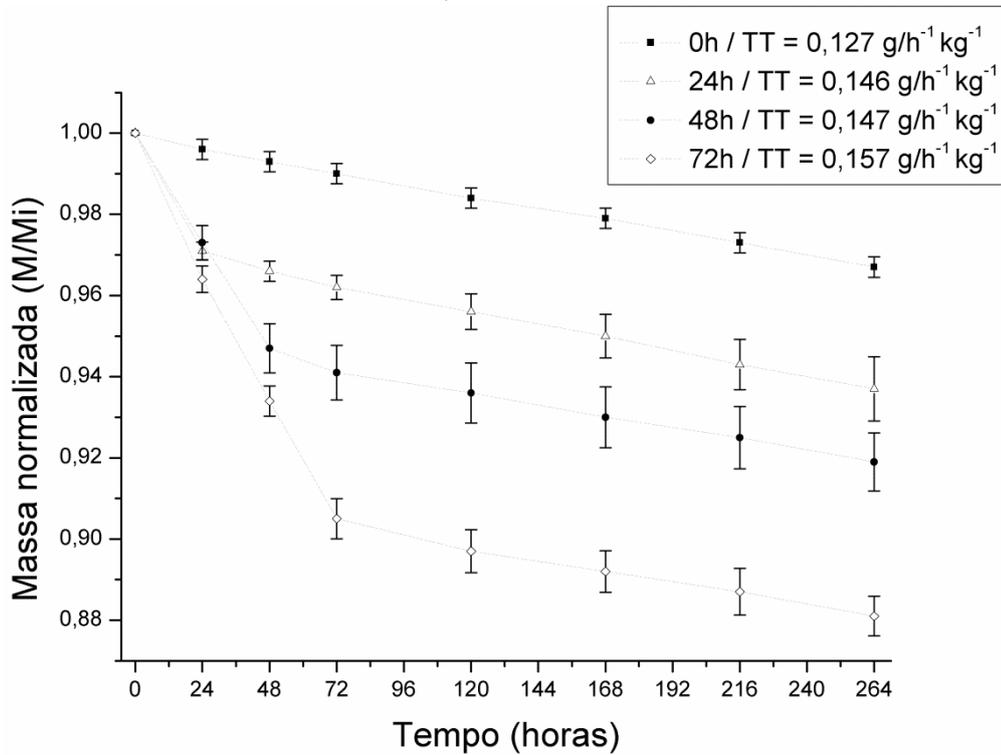
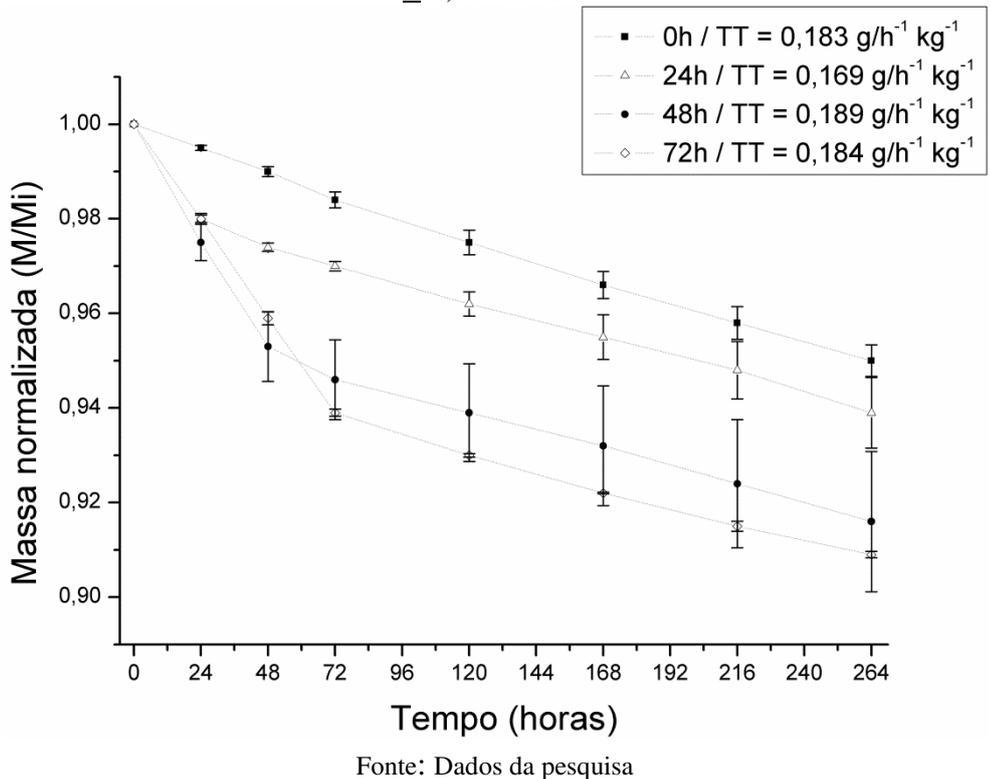
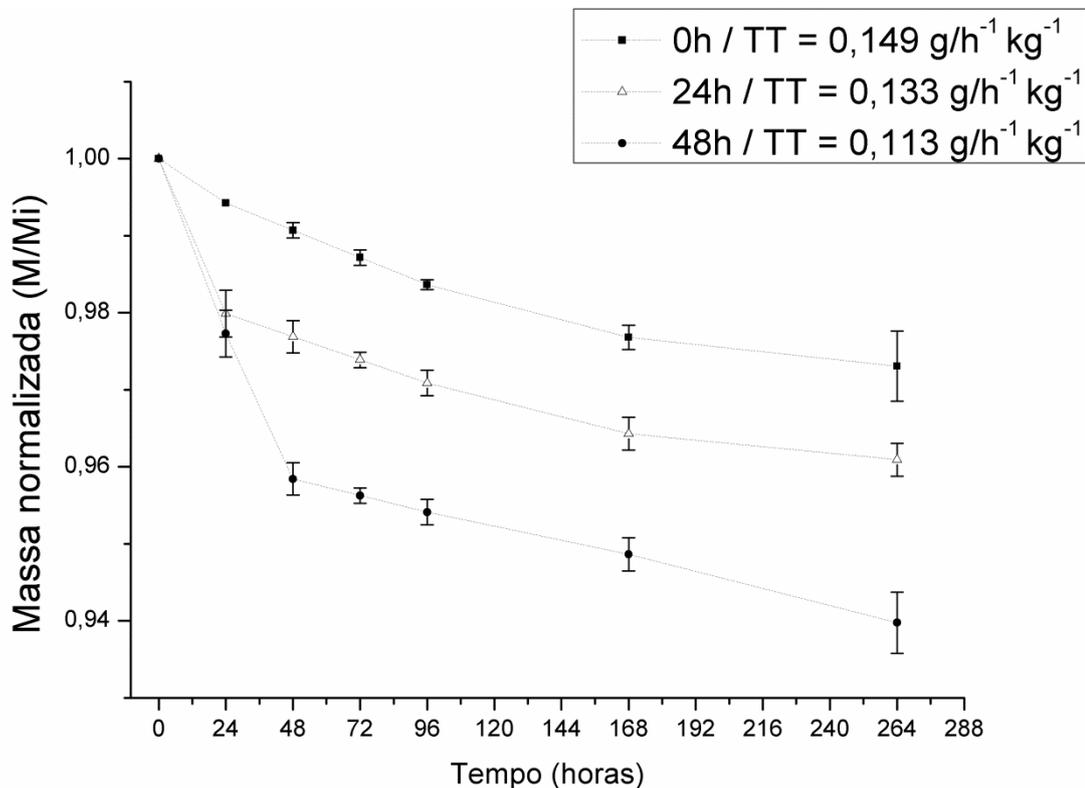


Figura 8 - Efeito dos diferentes tempos de espera sobre as taxas de transpiração (TT; $\text{g h}^{-1} \text{kg}^{-1}$) de uvas ‘Crimson Seedless’ durante armazenamento em refrigeração a $11,0 \pm 1,4$ °C e $54,2 \pm 9,9\%$ de UR



Na Figura 9 é mostrado o ensaio feito com uvas da variedade ‘Niagara’, as quais foram submetidas aos mesmos tempos de espera definidos anteriormente (24, 48 e 72 horas) e em seguida foram transferidas para ambiente refrigerado ($2,3 \pm 1,7$ °C e $49,5 \pm 12,1\%$ de UR). No entanto, a taxa de transpiração medida nos frutos submetidos ao ensaio de 72 horas de tempo de espera foi discrepante das demais, e assim desconsiderado, pois houve um problema de congelamento das amostras por volta do terceiro para o quarto dia de acompanhamento. Porém, é possível notar pelas taxas de transpiração calculadas para os *cooling delays* de 24 e 48h, que as observações feitas para os ensaios com o cultivar ‘Crimson Seedless’ são válidas para a variedade ‘Niagara’ também.

Figura 9 - Efeito dos diferentes tempos de espera sobre as taxas de transpiração (TT; $\text{g h}^{-1} \text{kg}^{-1}$) de uvas ‘Niagara’ durante armazenamento em refrigeração a $2,3 \pm 1,7$ °C e $49,5 \pm 12,1\%$ de UR



Fonte: Dados da pesquisa

Esses resultados corroboram para a constatação de que o metabolismo dessas frutas não é afetado irreversivelmente pelos tempos de atraso para dar início à refrigeração, uma vez que diminuições na perda de massa estão relacionadas ao abaixamento de taxas respiratórias (PALOU et al., 2010). No entanto, mesmo assim é recomendável que uvas sejam refrigeradas o mais rapidamente possível após a colheita e sejam embaladas em material que minimize a redução da umidade (CRISOSTO; SMILANICK; DOKOOZLIAN, 2001). É

evidente que o quanto antes o resfriamento for aplicado, mais o parâmetro que mede a qualidade inicial será preservado. Entretanto, nas Figuras 8 e 9 pode-se verificar que, apesar de oscilações de temperatura durante a armazenagem serem muito prejudiciais ao produto, taxas de transpiração mínimas podem ser restabelecidas à medida que o resfriamento é retomado.

Resultados parecidos foram obtidos em estudo feito com duas variedades de maçãs ('Royal Gala' e 'Cox's Orange Pippin'), no qual os autores determinaram o efeito de tratamentos sequenciais de temperatura sobre a taxa de amolecimento, i.e., perda de firmeza dos frutos (JOHNSTON; HEWETT; HERTOG, 2005). Nesse trabalho, as frutas foram propositalmente expostas às temperaturas ambientais na colheita, durante a armazenagem foram removidas dos ambientes refrigerados e algumas foram avaliadas após serem transferidas para um ambiente de vida de prateleira. Os autores concluem que as taxas de perda de firmeza dos frutos em uma dada temperatura foram similares entre si, independentemente de esses terem sido expostos a altas temperaturas anteriormente ou se foram mantidos em refrigeração constante (0,5 a 3,0 °C). Logicamente, a refrigeração imediata após a colheita resultou em frutos mais firmes e com menor concentração interna de etileno, prolongando a sua vida útil. No entanto, esses resultados indicaram que as taxas de deterioração estimadas em temperaturas constantes eram úteis para descrever a perda de firmeza em tratamentos com mais de uma temperatura.

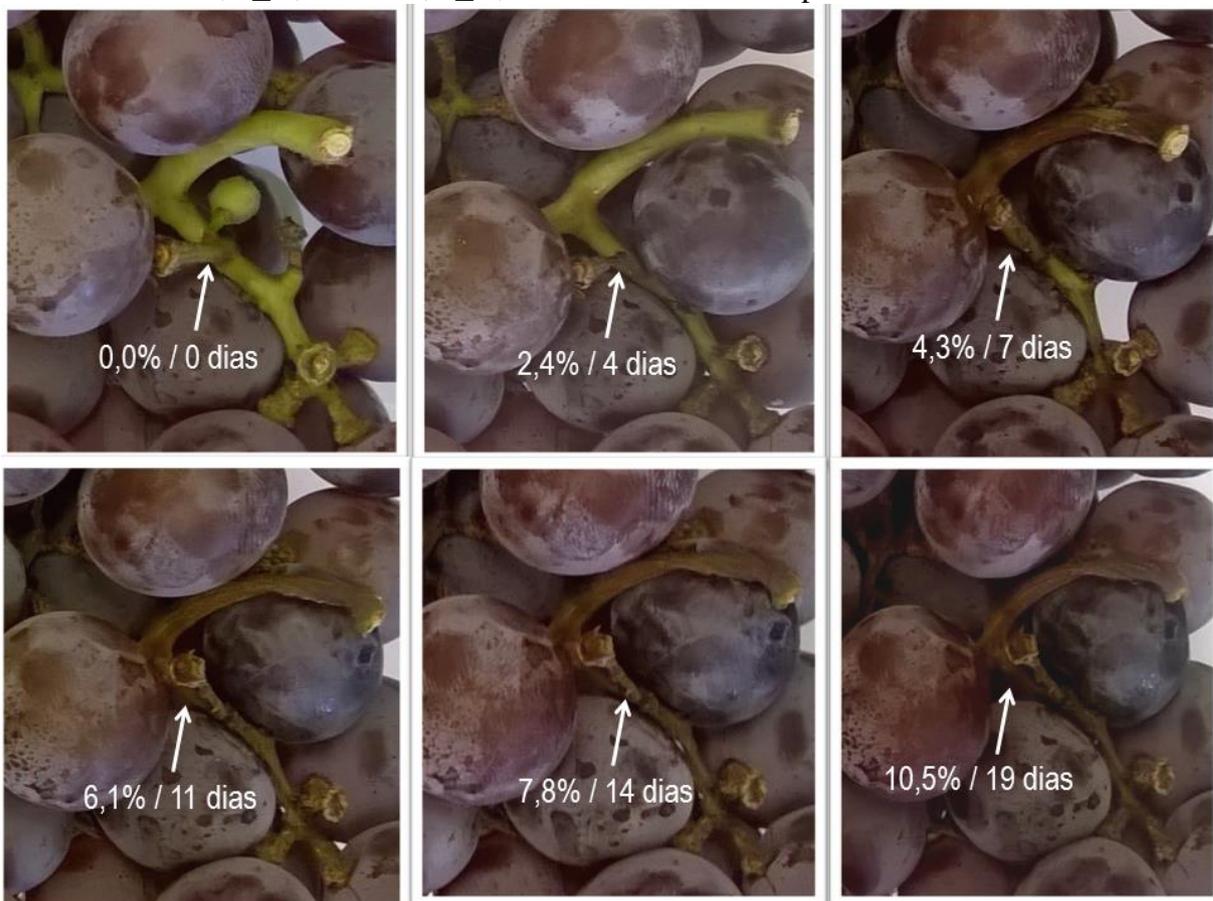
Apesar da taxa de transpiração não ser estritamente governada pela temperatura como a perda de firmeza em maçãs, ela é influenciada por processos metabólicos (e.g. respiração) os quais são funções da temperatura, conforme a relação de Arrhenius. Uma vez que o calor gerado no interior do produto durante a respiração o aquece, haverá a conversão de calor sensível em latente, sendo esse último utilizado para evaporação de água na transpiração. Como já foi constatada anteriormente, a perda de água tem efeito permanente sobre a aparência visual da ráquis (CRISOSTO; MITCHELL, 2002; CRISOSTO; SMILANICK; DOKOOZLIAN, 2001; LICHTER et al., 2011). Dessa maneira mesmo que o metabolismo do fruto seja reduzido pela aplicação de refrigeração após períodos de espera em temperatura ambiente, a sua vida útil é reduzida consideravelmente por esses eventos. Portanto, continua sendo recomendável que a aplicação do frio seja feita o quanto antes depois da colheita dos cachos.

5.3 Escurecimento da ráquis e aspecto visual dos cachos

5.3.1 Escurecimento da ráquis

Os sintomas visíveis de escurecimento da ráquis foram observados nas uvas ‘Niagara’ a partir de perdas de massa do cacho em torno de 2,0 a 2,4% da massa inicial. Na Figura 10 é mostrada a evolução do escurecimento da ráquis em um cacho desse cultivar (armazenado na temperatura de $2,3 \pm 1,7$ °C e $45,9 \pm 6,4\%$ de UR por um período de dezenove dias). São indicados na Figura 10 os percentuais de perda de massa relativa e os tempos de armazenamento correspondentes.

Figura 10 - Escurecimento da ráquis de cachos de uvas da variedade ‘Niagara’ armazenados a $2,3 \pm 1,7$ °C e $45,9 \pm 6,4\%$ de UR durante um período de 19 dias

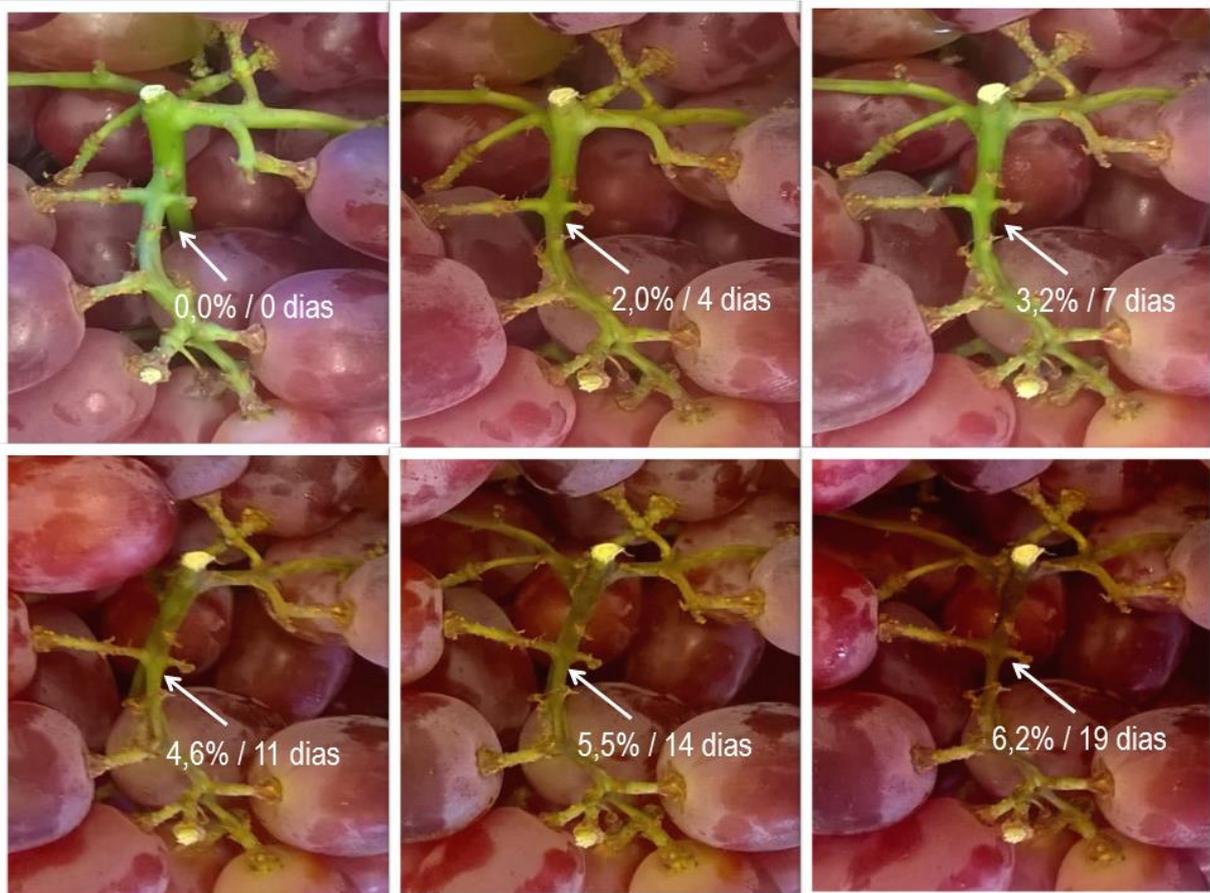


Fonte: Elaborada pelo autor

Na Figura 11 é possível observar que para as uvas da variedade ‘Crimson Seedless’ foram necessárias perdas de massa em torno de 3,0% para que os primeiros sinais de desidratação do engaço fossem visíveis no pedúnculo e receptáculos que ligam a haste principal dos cachos às bagas. Na Figura 11 também são indicados os percentuais de perda de massa relativa e os tempos de armazenamento correspondentes. A progressão do

escurecimento da ráquis de um cacho de uvas ‘Crimson Seedless’ (armazenado à $2,5 \pm 1,6$ °C e $49,5 \pm 12,1\%$ de UR durante dezenove dias) indicou que, para essa variedade, o escurecimento da haste principal da ráquis só foi observado a partir de reduções de peso de 4,0 a 4,6%. Essas observações são coerentes com os resultados obtidos no estudo realizado por Valverde et al. (2005), no qual a qualidade das ráquis de frutos da variedade ‘Crimson Seedless’ foi avaliada por um grupo de dez julgadores treinados. Os sintomas de escurecimento foram considerados severos quando os cachos haviam perdido cerca de 4% da sua massa, depois de 7 dias de armazenamento à 1 °C. Comparativamente, as ráquis de cachos de uvas da variedade ‘Redglobe’, avaliadas por um painel composto por cinco julgadores treinados, foram classificadas como parcialmente desidratadas somente após perderem 7,4% de sua massa inicial (XU et al., 2007).

Figura 11- Escurecimento da ráquis em uvas da variedade ‘Crimson Seedless’ armazenados a $2,5 \pm 1,6$ °C e $49,5 \pm 12,1\%$ de UR durante um período de 19 dias



Fonte: Elaborada pelo autor

Esses dados reforçam a constatação de que os sinais visíveis do dano causado pela desidratação do engaço estão ligados à quantidade de massa perdida pelos cachos. No entanto, indicam que o gatilho para o aparecimento de sintomas aparentes pode depender da variedade

e de outros fatores internos (e.g. quantidade de água livre disponível, danos físicos na epiderme). Em uvas das variedades *Flame Seedless* e *Thompson Seedless* perdas de massa de 2,1 e 3,1%, respectivamente, foram necessárias para que sintomas de escurecimento do engaço fossem observados (CRISOSTO et al., 1994). Para uvas de mesa do cultivar ‘Kyoho’, a perda de massa dos cachos precisou chegar 2,1% para que a ráquis exibisse sinais leves de escurecimento (DENG; WU; LI, 2006). Já para uvas da variedade ‘Superior’ os sinais de escurecimento da ráquis começaram a ser notados a partir de perdas de massa entre 1,5 a 3% (LICHTER et al., 2011).

No entanto, nesse estudo de Lichter et al. (2011) os autores concluem que nem sempre a perda de massa dos cachos tem uma correlação direta com o escurecimento do engaço. De acordo com esse artigo, apesar do fato de que a perda de massa dos cachos é uma medida instantânea e objetiva muitas vezes utilizada para estipular o gatilho para o início do escurecimento, o indicador peso seco da ráquis (razão entre o peso da ráquis fresca pelo seu peso após desidratação) é uma medida mais direta da sua qualidade. Eles justificam esse argumento devido aos pontos fora da curva encontrados no experimento, nos quais sinais de escurecimento da ráquis foram perceptíveis na avaliação sensorial, porém a perda de massa do cacho estava longe do valor crítico. Já para o indicador sugerido (peso seco da ráquis) essa dicotomia não foi constatada em nenhum dos testes feitos.

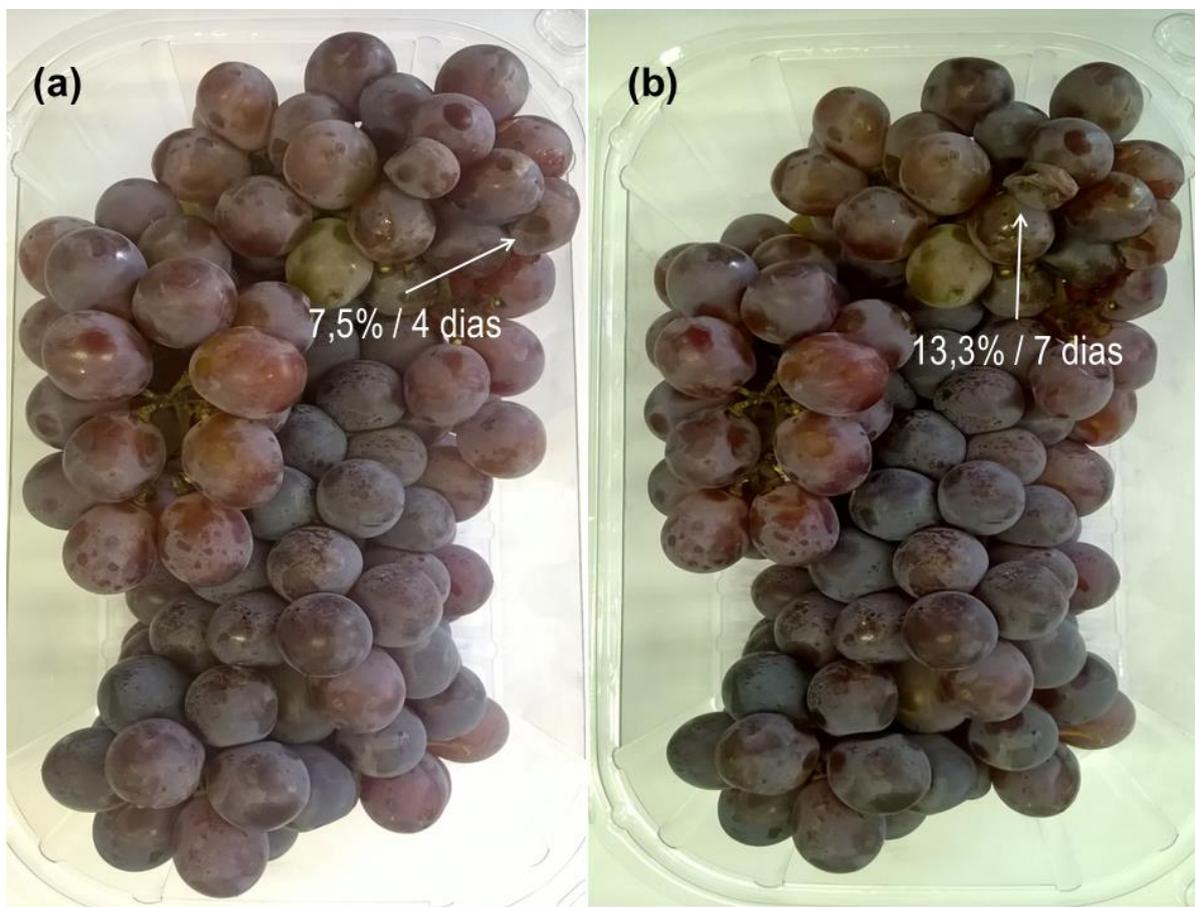
Além disso, outros autores ponderam que apesar do papel central desempenhado pela redução da umidade no fenômeno de escurecimento da ráquis, até então não há muitos estudos dedicados a esclarecer os mecanismos celulares e moleculares envolvidos no processo (BALIC et al., 2012). Recentemente, pesquisadores constataram que a utilização de embalagens com AM reduz o escurecimento da ráquis, apesar de acelerarem a degradação de moléculas de clorofila (SILVA-SANZANA et al., 2016). Isso é provavelmente devido ao fato de a clorofila não ser o único pigmento de cor verde presente na ráquis. Em outro trabalho foi constatado que apesar de a utilização de embalagens de AM em uvas das variedades ‘Mystery Seedless’, ‘Superior Seedless’ e ‘Crimson Seedless’ ter diminuído a perda de massa em todos os cultivares, em alguns destes não houve redução do escurecimento ráquis (RABAN et al., 2013).

Assim, fica claro, a partir destes relatos, que somente a prevenção da desidratação dos cachos não é o suficiente para evitar o escurecimento da ráquis. Além disso, estudos mais aprofundados são necessários para que seja possível descrever com mais detalhes a relação entre a perda de massa dos cachos e os de sintomas de escurecimento da ráquis.

5.3.1 Aspecto visual dos cachos

Na Figura 12 é mostrado que cachos de uvas ‘Niagara’ (armazenados a $25,0 \pm 2,0$ °C e $47,9 \pm 8,9\%$ de UR) apresentaram as primeiras bagas murchas a partir de perdas de massa da ordem de 5% a 7,5%, indicando que, provavelmente a partir de 5% de redução da massa relativa, os cachos dessa variedade começariam a ter o seu valor comercial afetado. Subsequentemente, quando a perda de massa percentual chegou ao nível de 10 a 13%, o aspecto visual dos cachos estava perceptivelmente prejudicado.

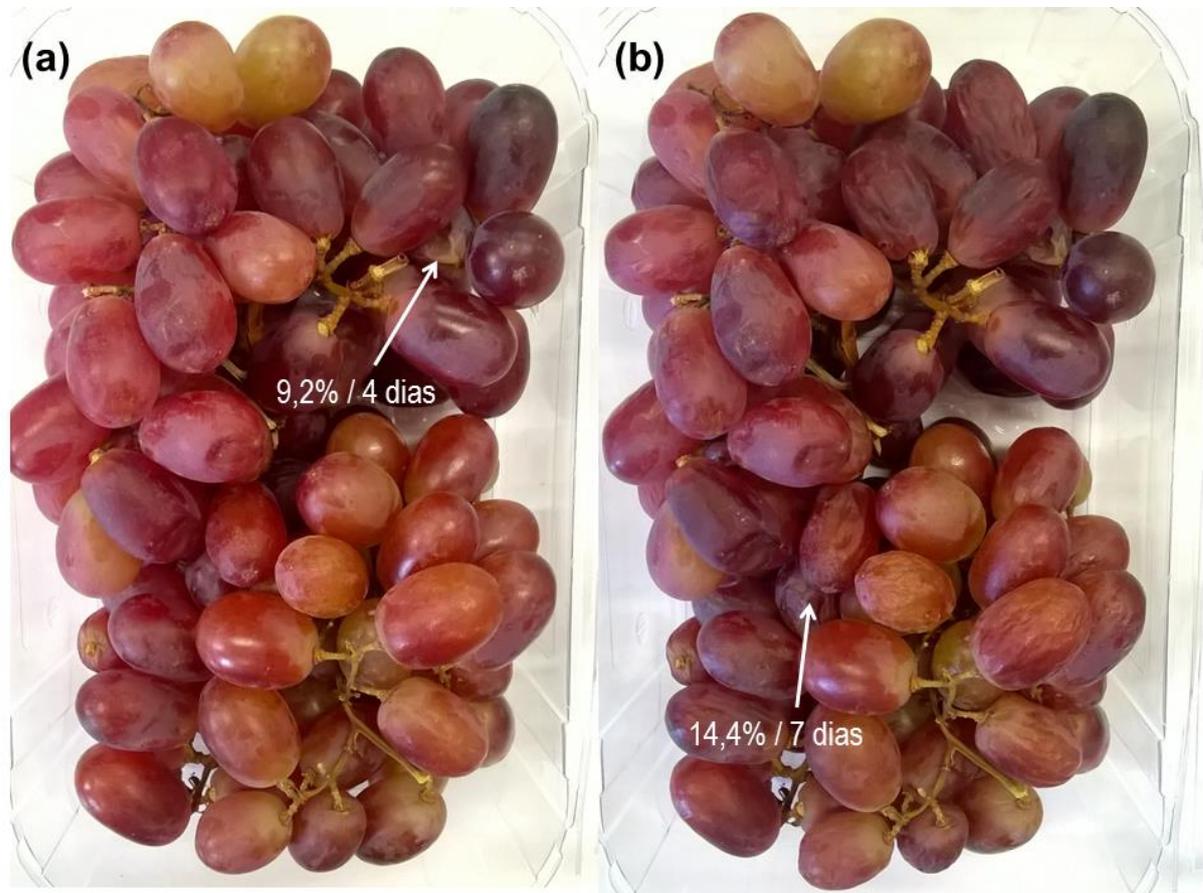
Figura 12 - Ressecamento das bagas em um cacho de uvas 'Niagara' armazenado a $25,1 \pm 2,0$ °C e $47,9 \pm 8,9\%$ de UR. (a) 4º dia de armazenamento, (b) 7º dia de armazenamento



Fonte: Elaborada pelo autor

Já para as uvas ‘Crimson Seedless’ somente a partir de perdas de massa de cerca 9% é que apareceram os primeiros sinais de bagas murchas. Os sinais de ressecamento dos frutos ficaram claramente evidentes quando os cachos haviam perdido em média 14% do seu peso inicial. Na Figura 13, é apresentado um cacho de uva ‘Crimson Seedless’ (armazenado a $25,1 \pm 2,0$ °C e $45,3 \pm 8,9\%$ UR) e a evolução dos sintomas de ressecamento das bagas relacionados à quantidade de massa perdida no momento dos registros.

Figura 13 - Ressecamento das bagas em um cacho de uvas ‘Crimson Seedless’ armazenado a $25,1 \pm 2,0$ °C e $45,3 \pm 8,9\%$ de UR. (a) 4º dia de armazenamento, (b) 7º dia de armazenamento



Fonte: Elaborada pelo autor

Assim como o escurecimento da ráquis, os sinais visíveis de frutos murchos e secos em cada variedade foram perceptíveis a partir de diferentes patamares de perda de massa dos cachos. Esses resultados indicam, considerando uma vida útil comercial dos cachos baseada no aspecto visual das bagas, que algumas variedades de uva toleram melhor a perda de água do que outras.

No caso de uvas dos cultivares sem semente Flame, Thompson, Fantasy e dos cultivares com semente Redglobe e Perlette, por exemplo, sinais de ressecamento dos frutos foram reportados a partir de perdas de 4,6% da massa inicial do cacho (CRISOSTO; SMILANICK; DOKOOZLIAN, 2001). Apesar de o limite de 5% ser o valor mais comumente encontrado na literatura, referenciando o máximo aceitável para perda de massa em cachos de uvas (CRISOSTO; MITCHELL, 2002; DENG; WU; LI, 2006; KADER, 2002a; NELSON, 1978), ao que tudo indica, essa medida pode ser diferente dependendo do cultivar em questão. Entretanto, de um ponto de vista prático e comercial é interessante se trabalhar com um limite

comum para a maioria das variedades a título de padronização das operações de monitoramento e controle de qualidade.

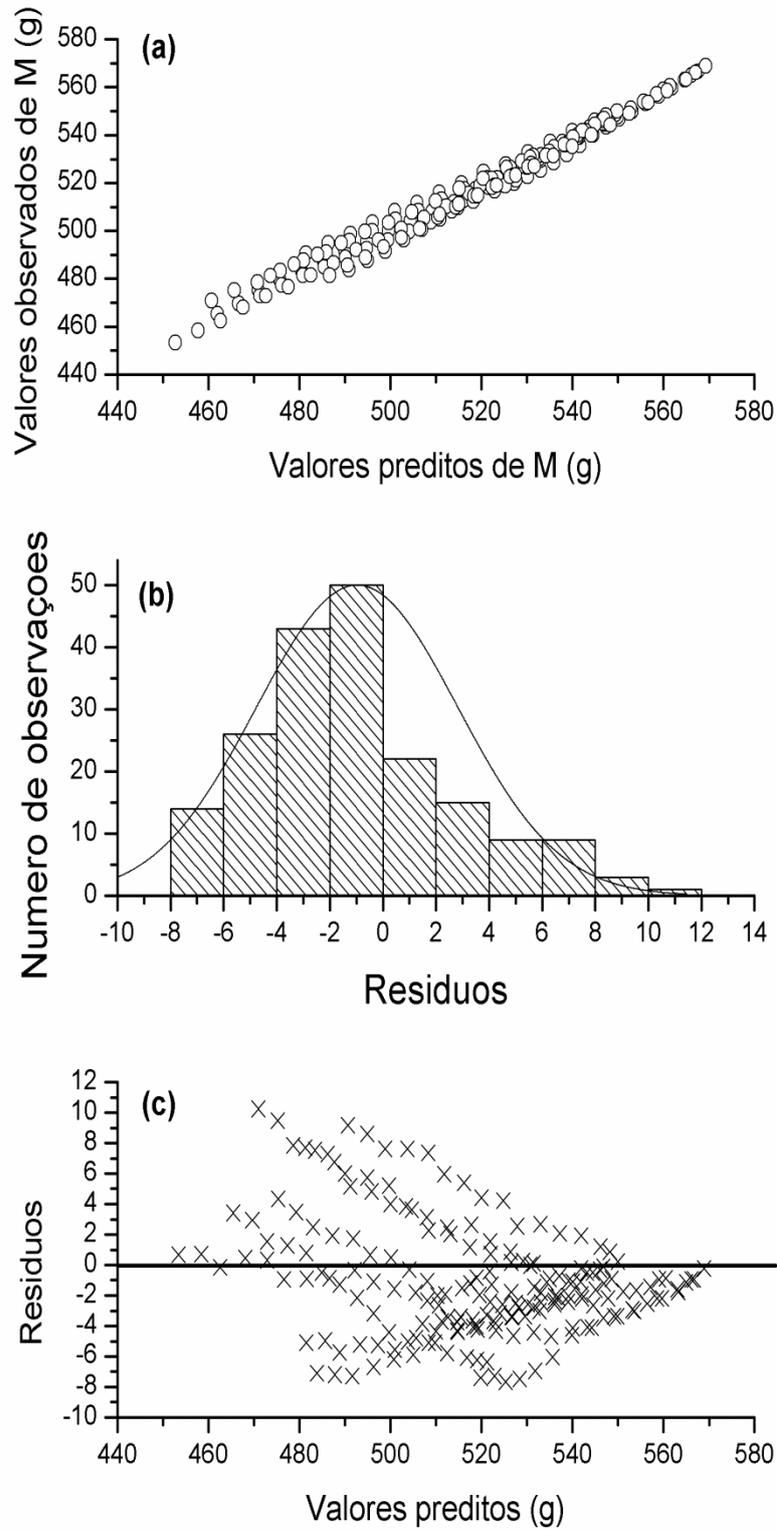
Como relatado no projeto de pesquisa europeu PASTEUR, focado no monitoramento de produtos perecíveis e rastreabilidade de qualidade (HERTOG et al., 2014, 2015), as condições de temperatura e umidade relativa foram monitoradas e utilizadas para estimar a perda de massa em morangos. O gatilho adotado para o aparecimento de frutos visivelmente ressecados e murchos foi estabelecido como 5% de perda de massa relativa (para algumas variedades de morango). Assim, pelo monitoramento das condições ambientais era possível estimar a perda de massa dos frutos sendo movimentados pela cadeia de distribuição e restabelecer destinos e prazos, conforme o decaimento nesse atributo de qualidade. Estratégia parecida pode ser implantada na cadeia de suprimento de uvas por meio da adoção de um limite aceitável comum para a perda de massa dos cachos de diferentes variedades e aplicação de modelos preditivos específicos que auxiliem nas tomadas de decisões.

5.4 Parametrização e validação do modelo preditivo

5.4.1 Ajuste de parâmetros

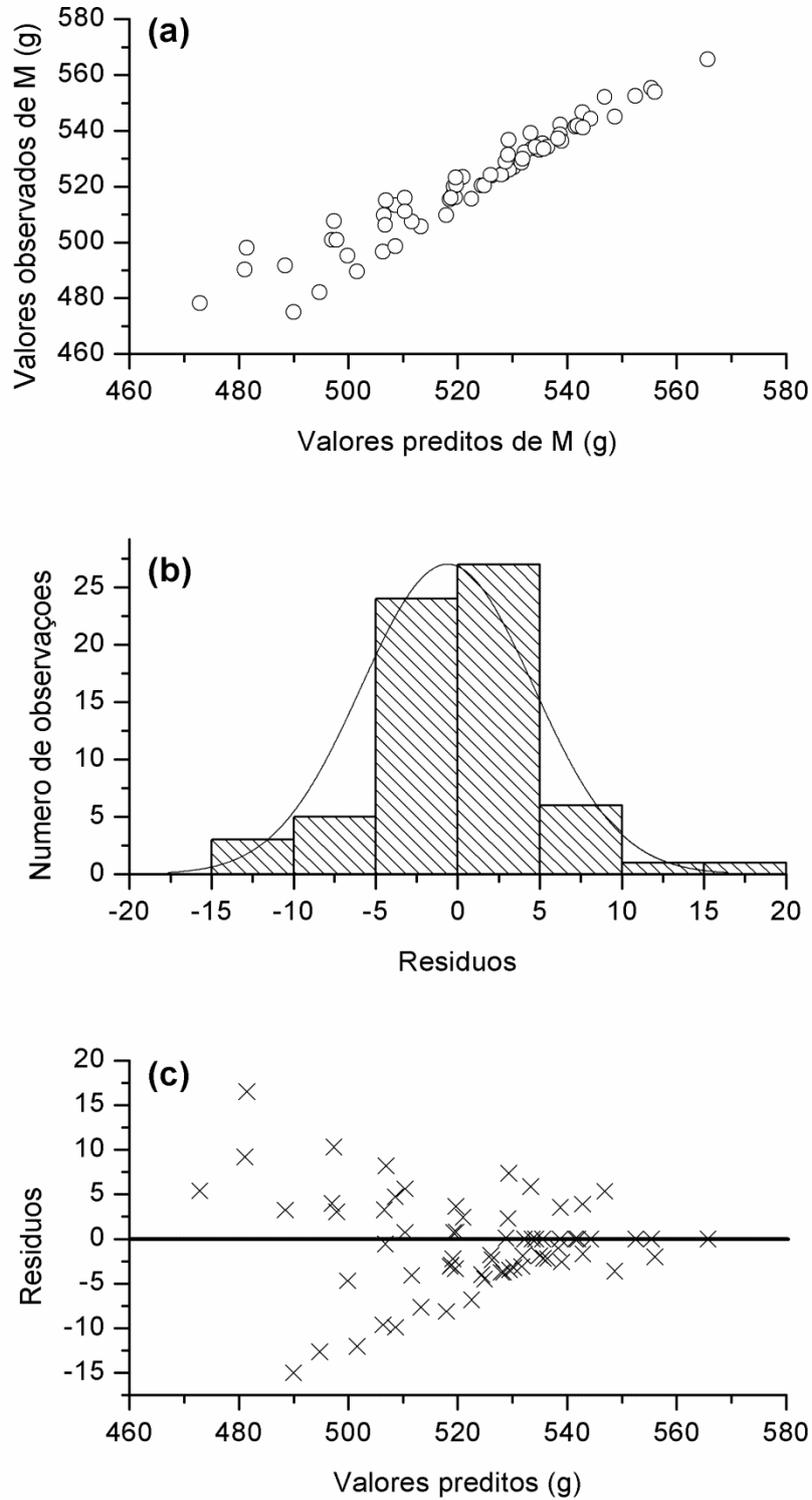
A Equação 27 foi utilizada para ajustar os dados experimentais obtidos nas diferentes condições de temperatura controlada e umidade relativa monitorada, descritas na Tabela 1. Assim os coeficientes constantes (k_t e b) foram calculados utilizando regressão não linear (Statística 7, Statsoft, Inc., EUA). Na Figura 14a e Figura 15a, são mostradas as relações entre os valores observados e preditos para a massa das uvas das variedades ‘Crimson Seedless’ e ‘Niagara’, respectivamente. Nos gráficos de barras da Figura 14b e Figura 15b são mostradas as distribuições dos resíduos obtidos pelas previsões feitas com o modelo matemático da Equação 27 para a variedade ‘Crimson Seedless’ e ‘Niagara’, respectivamente. Os histogramas mostram que a distribuição de resíduos foi normal, como quantificado pelo teste Kolmogorov-Smirnov para as previsões da massa das uvas ‘Crimson Seedless’ ($d = 0,110$; Figura 14b) e ‘Niagara’ ($d = 0,116$; Figura 15b), indicando que não há tendência específica. Na Figura 14c e Figura 15c é mostrada a distribuição dos valores preditos para a massa dos cachos versus os resíduos gerados pelas previsões para as uvas ‘Crimson Seedless’ e ‘Niagara’, respectivamente.

Figura 14 - Relação entre os valores preditos e observados para a massa de uvas ‘Crimson Seedless’ para todas as condições testadas e distribuição dos resíduos dos resultados preditos



Fonte: Regressão não linear feita no software (Statistica 7, Statsoft, Inc., EUA)

Figura 15 - Relação entre os valores preditos e observados para a massa de uvas ‘Niagara’ para todas as condições testadas e distribuição dos resíduos dos resultados preditos



Fonte: Regressão não linear feita no software (Statistica 7, Statsoft, Inc., EUA)

Os valores preditos para a massa foram coerentes com os obtidos experimentalmente para os testes realizados com ambas as variedades ('Niagara' $R^2 > 0,927$ e 'Crimson Seedless' $R^2 > 0,975$). Portanto, o modelo descreveu adequadamente as perdas de massa dos frutos. Assim, os coeficientes da Equação 30 [$M = M_0 - \sum_0^{i=n} k_t (a_w - a_{w_{at}}) (1 - e^{-bT(i)})(M_0/1000)t_i$] são mostrados na Tabela 3, bem como os valores de erro padrão (EP) para as estimativas.

Tabela 3 – Parâmetros do modelo matemático da Equação 30

Variedade	$k_t \pm \text{EP (g h}^{-1} \text{ kg}^{-1})$	$b \pm \text{EP (}^\circ\text{C}^{-1})$	$R^2 (\%)$
'Crimson Seedless'	$0,479 \pm 0,008$	$0,212 \pm 0,008$	97,5
'Niagara'	$0,606 \pm 0,038$	$0,181 \pm 0,025$	92,7

Fonte: Dados da pesquisa

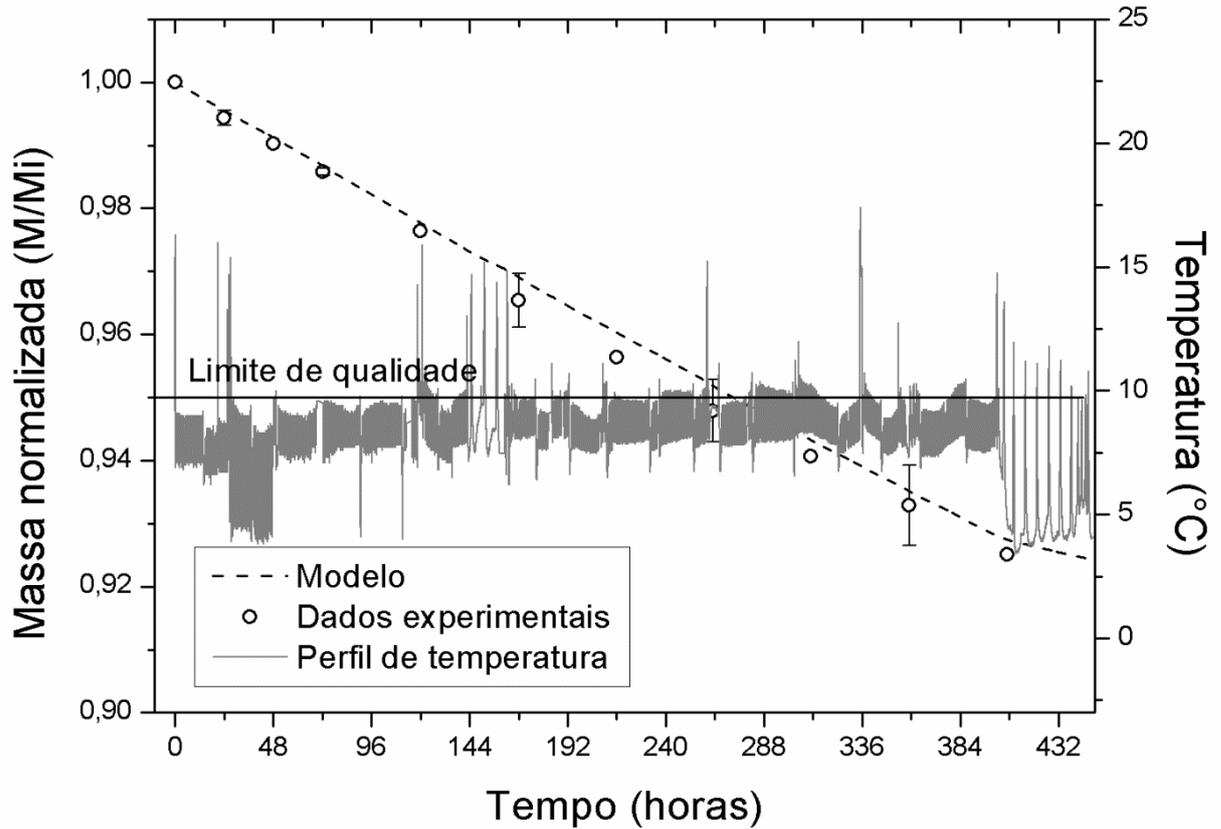
É importante ressaltar que as calibrações obtidas para os modelos, i.e., as estimativas dos parâmetros desconhecidos, são únicas para as variedades estudadas e nas condições de embalagem descritas nesse estudo. Portanto, caso o procedimento seja aplicado para cultivares e *designs* de embalagem diferentes, os parâmetros devem ser revisados. Além disso, considerando-se que o ajuste dos parâmetros foi realizado com base nos resultados experimentais obtidos para perda de massa em todos os ensaios isotérmicos, os coeficientes médios estimados são válidos para as faixas de temperatura estudadas. Uma vez que, a temperatura juntamente com a umidade relativa são as condições ambientais que afetam diretamente a parametrização do modelo descrito na Equação 30, pode-se afirmar que $k_t = f(T, UR)$ e $b = f(T, UR)$.

5.4.2 Validação do modelo

O modelo desenvolvido foi validado em um histórico de temperatura e UR variáveis gerado pelo acondicionamento das uvas 'Crimson Seedless' e 'Niagara' em refrigerador comum sujeita às flutuações de temperatura. Nas Figuras 16 e 17, são mostradas as medidas experimentais versus os resultados preditos para as massas dos frutos e os históricos de temperatura para o acondicionamento de uvas das variedades 'Crimson Seedless' e 'Niagara', respectivamente. Houve boa concordância entre os valores preditos e os valores observados para a massa nos dois testes, com módulo significativo de desvio percentual relativo (E%) menor que 1% (MCLAUGHLIN; O'BEIRNE, 1999) para ambos. Os coeficientes de determinação (R^2) foram 0,996 e 0,999 para a validação com uvas 'Crimson Seedless' e 'Niagara', respectivamente. Esses resultados confirmaram a habilidade preditiva

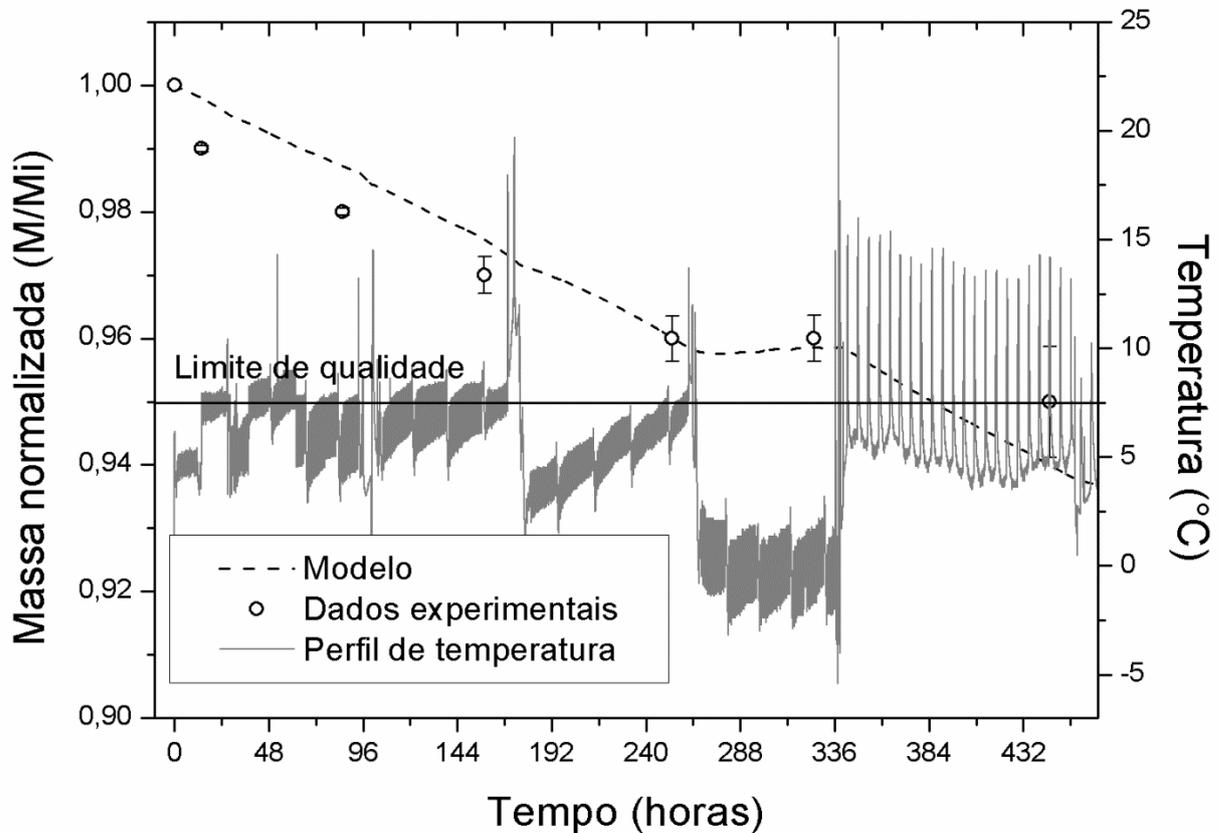
do modelo e validaram a estratégia de adaptação do mesmo para cenários de temperatura e UR variáveis.

Figura 16 - Resultados experimentais, resultados preditos pelo modelo matemático e histórico térmico para teste de validação com uvas ‘Crimson Seedless’ armazenadas em refrigerador comum (temperatura média $8,2 \pm 1,5$ °C)



Fonte: Dados da pesquisa

Figura 17 - Resultados experimentais, resultados preditos pelo modelo matemático e histórico térmico para teste de validação com uvas ‘Niagara’ armazenadas em refrigerador comum (temperatura média $5,1 \pm 2,9$ °C)



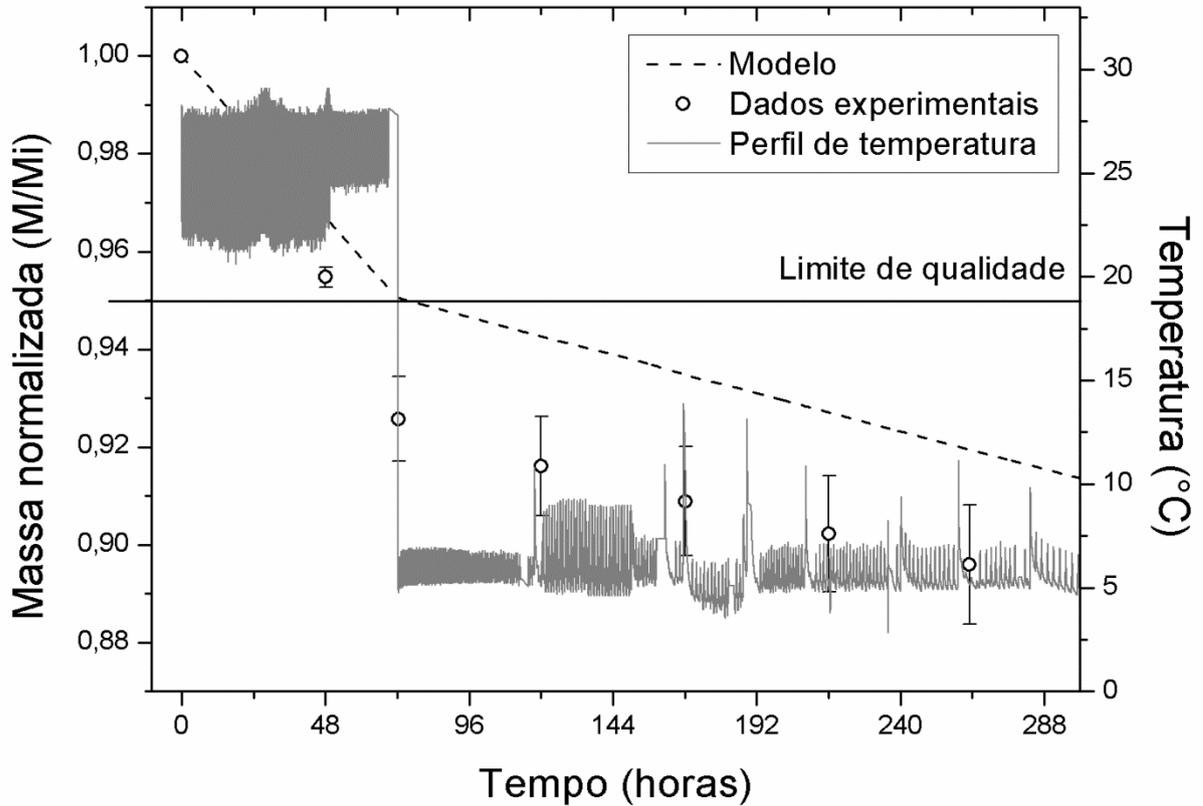
Fonte: Dados da pesquisa

O modelo desenvolvido também foi validado com alguns dos testes de tempo de espera, nos quais os frutos de ambas as espécies foram mantidos a temperatura e UR de ambientes não refrigerados ($25,1 \pm 1,9$ °C / $45,3 \pm 4,3\%$ de UR e $25,1 \pm 1,2$ °C / $47,5 \pm 8,7\%$ de UR; para as uvas ‘Crimson Seedless’ e ‘Niagara’, respectivamente) por um período de 72 horas. Nas figuras 18 e 19, são mostradas as medidas experimentais versus os resultados preditos pelo modelo (massas normalizadas), além do histórico de temperatura durante o período de *cooling delay* e posterior armazenamento em refrigerador ($2,5 \pm 1,6$ °C / $49,5 \pm 12,1\%$ de UR e $2,3 \pm 1,7$ °C / $45,9 \pm 6,4\%$ de UR; para as uvas ‘Crimson Seedless’ e ‘Niagara’, respectivamente).

O módulo do desvio percentual relativo (E%) para o teste de validação com uvas ‘Crimson Seedless’ (Figura 18) foi de 7,2%, um valor bem acima do obtido no teste com essa variedade armazenada em refrigerador comum. No entanto, segundo Aguerre; Suarez; Viollaz (1989 apud MCLAUGHLIN; O’BEIRNE, 1999) valores de $E\% < 10\%$ são definidos como bons ajustes para o modelo. Já para a variedade ‘Niagara’ o teste de validação com a situação de *cooling delay* (Figura 19) resultou em um módulo do desvio percentual relativo (E%) de

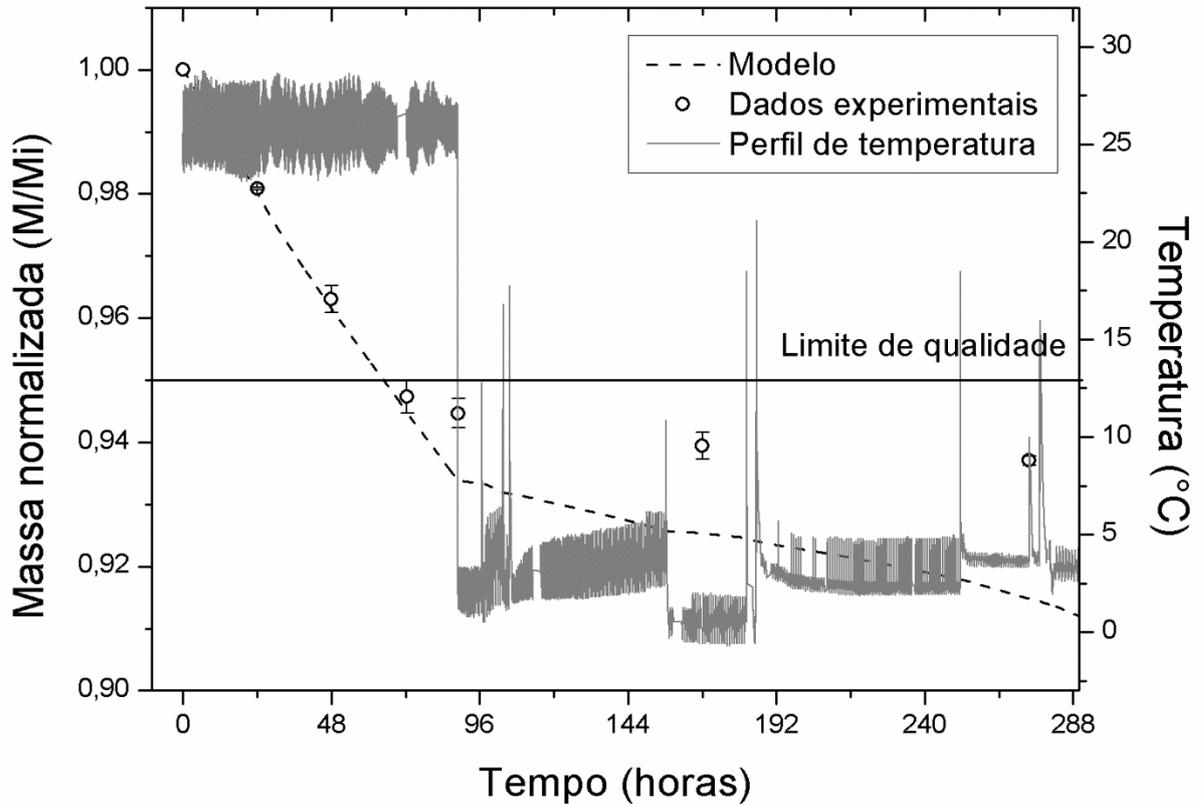
0,68%, demonstrando a boa concordância entre os valores preditos e observados. Os coeficientes de determinação (R^2) foram de 0,665 e 0,778 para os testes com ‘Crimson Seedless’ e ‘Niagara’, respectivamente.

Figura 18 - Resultados experimentais, resultados preditos pelo modelo matemático e histórico térmico para teste de validação com uvas ‘Crimson Seedless’ submetidas à *cooling delay* por 72 horas ($25,1 \pm 1,2$ °C / $47,5 \pm 8,7\%$ de UR) e posterior armazenamento em refrigerador ($2,3 \pm 1,7$ °C / $45,9 \pm 6,4\%$ de UR)



Fonte: Dados da pesquisa

Figura 19 - Resultados experimentais, resultados preditos pelo modelo matemático e histórico térmico para teste de validação com uvas ‘Crimson Seedless’ submetidas à *cooling delay* por 72 horas ($25,1 \pm 1,9$ °C / $45,3 \pm 4,3\%$ de UR) e posterior armazenamento em refrigerador ($2,5 \pm 1,6$ °C / $49,5 \pm 12,1\%$ de UR)



Fonte: Dados da pesquisa

A congruência entre os valores de massa preditos pelo modelo e os dados experimentais observados corrobora para a argumentação de que a perda de massa em uvas é principalmente afetada pela desidratação causada pelo processo de transpiração. Com a validação do modelo preditivo em condições de conservação variáveis, há indicativos de que a abordagem utilizada aqui seja útil para fazer estimativas de vida útil e previsões de mudanças em atributos de qualidade nos produtos sendo transportados em uma cadeia de suprimentos real.

Recentemente têm sido publicados trabalhos (JEDERMANN et al., 2014a; VENUS et al., 2013) nos quais modelos matemáticos, ajustados previamente em testes de laboratório com condições controladas e posteriormente validados em situações dinâmicas de estocagem, alcançaram boa concordância com os dados obtidos experimentalmente.

Em estudo sobre o monitoramento da cadeia de distribuição intercontinental de bananas Jedermann et al. (2014a) utilizaram o histórico térmico dos frutos transportados via contêiner para calcular a quantidade de calor de respiração gerada. Antes da aplicação do

modelo em condições de conservação dinâmicas, o efeito da temperatura, UR e concentrações de CO₂ e O₂ foram estudados em uma série de experimentos laboratoriais. Tendo o modelo parametrizado e ajustado, os autores demonstraram a utilidade de modelos de previsão de vida útil para implantar estratégias de gerenciamento de estoques baseadas na qualidade (e.g. FEFO; *First Expire First Out* – Primeiro Expira Primeiro Sai).

Outra aplicação bem sucedida de modelos preditivos de qualidade foi relatada em Venus et al. (2013), onde os autores utilizaram o monitoramento de condições climáticas ambientais e monitoramento de microclimas dentro de caminhões cargueiros para determinar a deterioração da qualidade de tomates durante transporte internacional. Os autores utilizaram um modelo para a perda de firmeza dos frutos baseado em reações cinéticas de primeira ordem e na relação de Arrhenius para os processos dependentes da temperatura. Mais uma vez, as estimativas dos parâmetros desconhecidos, feitas em testes com condições controladas, que são específicas para a variedade estudada (cultivar *Hybrid* “PETOMECH VF II *improved*”), foram eficientes e funcionaram bem nos testes de validação.

Semelhantemente, a cadeia de suprimentos de uvas poderia ser potencialmente beneficiada pela utilização de modelos devidamente parametrizados como ferramentas de ajuda para o gerenciamento da qualidade dos lotes distribuídos. Devido a sua grande importância econômica e significativo volume comercializado globalmente, pesquisas focadas na redução dos desperdícios têm um vasto campo de crescimento. Além disso, as várias interpretações fenomenológicas da perda de água têm tradicionalmente abordado o tema, se baseando em ambientes com temperatura e umidade relativa controlada. Portanto, ainda falta ser quantificado precisamente qual o impacto das várias flutuações dessas condições climáticas sobre a taxa de transpiração dos frutos em uma cadeia real de suprimentos.

Sabe-se que as diferentes partes do engaço possuem diferentes taxas de transpiração (NGCOBO et al., 2013) e por contar com a barreira da casca as bagas também transpiram a taxas diferenciadas. No entanto, a abordagem utilizada no presente estudo se mostrou eficiente e capaz de fazer estimativas satisfatórias para a perda de massa das uvas. Dessa maneira esse modelo específico para a perda de massa pode, potencialmente, ser adaptado para aplicações mais generalistas como as propostas por Hertog et al. (2015) e Tijssens e Polderdijk (1996). Nessas proposições, modelos genéricos são utilizados para fazer previsões da quantidade de dias de vida útil remanescente. Combinando tais modelos às tecnologias de monitoramento remoto é possível obter sumários em tempo real do corrente *status* de qualidade do produto.

6 CONCLUSÕES

Considerando-se os ensaios experimentais realizados e os testes de validação do modelo matemático proposto, obtiveram-se as seguintes análises e conclusões:

- As taxas de perda de massa relativa das uvas, no *design* de embalagem utilizado nos experimentos, quando mantidas em refrigeração constante, foram de 0,29 a 0,44%/dia e 0,25 a 0,50%/dia para as uvas das variedades ‘Crimson Seedless’ e ‘Niagara’, respectivamente. Logo para ambas as variedades, considerando-se um limite de qualidade comum onde uma diminuição de 5% de massa em relação a inicial é o máximo de perda aceitável, o tempo de vida útil comercial foi estimado em 11 a 17 dias para as uvas ‘Crimson Seedless’ e 10 a 19 dias para as uvas ‘Niagara’. Assim, tomando como atributo limitante a redução de massa dos cachos, em nenhum dos casos, o prazo de validade de 30 dias, usualmente rotulado nas embalagens desses frutos, foi atingido.

- Já para frutos que passaram por *cooling delays*, o tempo de espera de 48 horas foi o suficiente para que os frutos perdessem uma quantidade de massa maior do que 5%. Os testes de tempo de espera indicam que as taxas de transpiração, em uma dada temperatura, não são influenciadas por exposições prévias às condições adversas.

- Por outro lado, os resultados da correspondência entre aspecto visual e percentual de perda de massa confirmam a importância de minimizar a exposição, às temperaturas ambientais elevadas, dos cultivares de uvas mais sensíveis à desidratação.

- Os resultados obtidos no teste de validação indicam que o modelo baseado na taxa de transpiração pode oferecer previsões satisfatórias, com desvios percentuais relativos menores que 1%, para a perda de massa das uvas em condições de temperatura e UR variáveis. Vale ressaltar que o presente estudo é limitado às faixas de temperatura (2,0 a 25,1 °C) e UR (45 a 60%) testadas. Em temperaturas muito maiores ou muito menores o problema se torna mais complexo por causa da possibilidade do aumento excessivo do calor de respiração e do congelamento das estruturas celulares.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A abordagem utilizada pode ser um bom ponto de partida para se entender a evolução da perda de água em uvas de mesa e sua relação com a temperatura, UR e o tempo. Além disso, apesar de o modelo ter sido validado somente para a perda de massa em uvas ‘Crimson Seedless’ e ‘Niagara’, o método descrito pode ser estendido para outras variedades de uvas e até mesmo para outras espécies de frutas. Futuros trabalhos consistiriam em experimentos utilizando combinações de temperatura e UR controlados e na avaliação do efeito de cada variável, bem como da interação entre elas, sobre a taxa de deterioração de frutas.

O modelo tem potencial para ser utilizado em combinação com sistemas de gerenciamento logístico para quantificar quais as consequências de flutuações de temperatura e UR sobre a vida útil de um lote de uvas viajando por uma cadeia de manipulação pós-colheita. Obviamente, suas aplicações práticas requerem mudanças consideráveis na organização da cadeia e demandam monitoramento constante das condições de conservação.

A hipótese de que os parâmetros médios obtidos para o modelo são constantes para as faixas de temperatura e UR estudadas foi testada tanto em condições de conservação variáveis como não variáveis. No entanto, futuros trabalhos podem testar combinações de uma faixa de UR fixa com diferentes níveis de temperatura, bem como fixar um nível de temperatura e os combinar com diferentes níveis de UR. Esse tipo de experimento possibilitaria a obtenção de parâmetros para o modelo na forma de funções $f(T)$ e $f(UR)$.

REFERÊNCIAS

- AGUERRE, R. J.; SUAREZ, C.; VIOLLAZ, P. E. New BET type multilayer sorption isotherms. Part II: Modelling water sorption in foods. **LWT - Food Science and Technology**, v. 22, n. 4, p. 192–195, 1989.
- AKED, J. Fruits and vegetables. In: KILCAST, D.; SUBRAMANIAM, P. (Eds.). . **The stability and shelf-life of food**. First ed. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2000. p. 249–273.
- ALFEREZ, F.; ALFRED, L.; BURNS, J. K. Low Relative Humidity at Harvest and Before Storage at High Humidity Influence the Severity of Postharvest Peel Pitting in Citrus. **Journal Of The American Society For Horticultural Science**, v. 130, n. 2, p. 225–231, 2005.
- AMODIO, M. L. et al. A Study of the Estimated Shelf Life of Fresh Rocket Using a Non-Linear Model. **Journal of Food Engineering**, v. 150, p. 19–28, abr. 2015.
- AMODIO, M. L.; DEROSI, A.; COLELLI, G. Modelling Sensorial and Nutritional Changes to Better Define Quality and Shelf Life of Fresh-Cut Melons. **Journal of Agricultural Engineering**, v. 43, n. 4, p. 6, 14 jun. 2013.
- AMOS, N. D. **Mathematical modelling of heat transfer and water vapour transport in apple coolstores**. [s.l.] Massey University, 1995.
- ARRHENIUS, S. On the reaction rate of the inversion of non-refined sugar upon souring. **Zeitschrift fur Physikalische Chemie**, v. 4, p. 226–248, 1889.
- BALIC, I. et al. Molecular and physiological study of postharvest rachis browning of table grape cv Red Globe. **Postharvest Biology and Technology**, v. 72, p. 47–56, 2012.
- BEN-YEHOSHUA, S. Transpiration, Sater Stress, and Gas Exchange. In: WEICHMANN, J. (Ed.). . **Postharvest physiology of vegetables**. New York: Marcel Dekker Inc., 1987. v. 1987p. 113–170.
- BHANDE, S. D.; RAVINDRA, M. R.; GOSWAMI, T. K. Respiration rate of banana fruit under aerobic conditions at different storage temperatures. **Journal of Food Engineering**, v. 87, n. 1, p. 116–123, 2008.
- BROUILLARD, R.; CHASSAING, S.; FOUGEROUSSE, A. Why are grape/fresh wine anthocyanins so simple and why is it that red wine color lasts so long? **Phytochemistry**, v. 64, n. 7, p. 1179–1186, dez. 2003.
- CASTELLANOS, D. A.; ALGECIRA, N. A. Modelling change in color and firmness of baby banana (*Musa acuminata* AA) in modified atmosphere packaging. **Agronomia Colombiana**, v. 30, n. 1, p. 84–94, 2012.
- CASTELLANOS, D. A.; HERRERA, A. O. Mathematical Models for the Representation of Some Physiological and Quality Changes during Fruit Storage. **Journal of Post-Harvest Technology**, v. 3, n. 1, p. 18–35, 2015.
- CASTELLANOS, D. A.; POLANÍA, W.; HERRERA, A. O. Development of an equilibrium modified atmosphere packaging (EMAP) for feijoa fruits and modeling firmness and color evolution. **Postharvest Biology and Technology**, v. 120, p. 193–203, out. 2016.

CHEN, C. R.; RAMASWAMY, H. S. Color and Texture Change Kinetics in Ripening Bananas. **LWT - Food Science and Technology**, v. 35, n. 5, p. 415–419, 2002.

CISA. **Resolução CISA/MA/MS nº 10**. Disponível em: <http://www.anvisa.gov.br/anvisa/legis/resol/10_84.htm>. Acesso em: 7 dez. 2016.

CORBO, M. R.; DEL NOBILE, M. A.; SINIGAGLIA, M. A novel approach for calculating shelf life of minimally processed vegetables. **International Journal of Food Microbiology**, v. 106, n. 1, p. 69–73, 2006.

CRISOSTO, C. H. et al. **Maintaining Table Grape Post-Harvest Quality for Long Distant Markets**. International Symposium on Table Grape Production. **Anais...Anaheim**: American Society for Enology and Viticulture, 1994. Disponível em: <<http://ucce.ucdavis.edu/files/datastore/234-335.pdf>>

CRISOSTO, C. H.; CRISOSTO, G. M. Understanding American and Chinese consumer acceptance of “Redglobe” table grapes. **Postharvest Biology and Technology**, v. 24, n. 2, p. 155–162, mar. 2002.

CRISOSTO, C. H.; GARNER, D.; CRISOSTO, G. Carbon dioxide-enriched atmospheres during cold storage limit losses from Botrytis but accelerate rachis browning of “Redglobe” table grapes. **Postharvest Biology and Technology**, v. 26, n. 2, p. 181–189, set. 2002.

CRISOSTO, C. H.; MITCHELL, F. G. Table Grapes. In: KADER, A. A. (Ed.). **Postharvest Technology of Horticultural Crops**. Third ed. Oakland: University of California Agricultural and Natural Resources, 2002. p. 357–363.

CRISOSTO, C. H.; SMILANICK, J. L.; DOKOOZLIAN, N. K. Table Grapes Suffer Water Loss, Stem Browning During Cooling Delays. **California Agriculture**, v. 55, n. 1, p. 39–42, jan. 2001.

DE SMEDT, V. et al. A Mathematical Model for the Development of Mealiness in Apples. **Postharvest Biology and Technology**, v. 25, n. 3, p. 273–291, jul. 2002.

DELELE, M. A. et al. Investigating the Effects of Table Grape Package Components and Stacking on Airflow, Heat and Mass Transfer Using 3-D CFD Modelling. **Food and Bioprocess Technology**, v. 6, n. 9, p. 2571–2585, 30 set. 2013.

DENG, Y.; WU, Y.; LI, Y. Physiological responses and quality attributes of “Kyoho” grapes to controlled atmosphere storage. **LWT - Food Science and Technology**, v. 39, n. 6, p. 584–590, ago. 2006.

DÍAZ-PÉREZ, J. C. Transpiration rates in eggplant fruit as affected by fruit and calyx size. **Postharvest Biology and Technology**, v. 13, n. 1, p. 45–49, jan. 1998.

DUARTE-SIERRA, A.; CORCUFF, R.; ARUL, J. Methodology for the determination of hormetic heat treatment of broccoli florets using hot humidified air: Temperature–time relationships. **Postharvest Biology and Technology**, v. 117, p. 118–124, 2016.

EEC. **Marketing Standard for Table Grapes**. Disponível em: <<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/ALL/?uri=CELEX:32011R0543>>. Acesso em: 24 nov. 2016.

FINNEGAN, E. et al. Modelling respiration in fresh-cut pineapple and prediction of gas permeability needs for optimal modified atmosphere packaging. **Postharvest Biology and**

Technology, v. 79, p. 47–53, 2013.

FONSECA, S. C.; OLIVEIRA, F. A. ; BRECHT, J. K. Modelling respiration rate of fresh fruits and vegetables for modified atmosphere packages: a review. **Journal of Food Engineering**, v. 52, n. 2, p. 99–119, abr. 2002.

FOURIE, J. F. Harvesting, Handling and Storage of Table Grapes (with Focus on Pre- and Post-Harvest Pathological Aspects). **Acta Horticulturae**, n. 785, p. 421–424, 2008.

GAO, P.; ZHU, Z.; ZHANG, P. Effects of chitosan-glucose complex coating on postharvest quality and shelf life of table grapes. **Carbohydrate polymers**, v. 95, n. 1, p. 371–8, 5 jun. 2013.

GARRIDO, Y.; TUDELA, J. A.; GIL, M. I. Comparison of industrial precooling systems for minimally processed baby spinach. **Postharvest Biology and Technology**, v. 102, p. 1–8, 2015.

GENARD, M.; GOUBLE, B. ETHY. A Theory of Fruit Climacteric Ethylene Emission. **Plant Physiology**, v. 139, n. 1, p. 531–545, 1 set. 2005.

GENTRY, J. P.; MITCHELL, F. G.; NELSON, K. E. Weight Loss of Grapes and Nectarines as Related to Humidity and Air Velocity of Storage. **Transactions of the ASAE**, v. 6, n. 3, p. 254–256, 1963.

GUSTAVSSON, J.; CEDERBERG, C.; SONESSON, U. **Global food losses and food waste – Extent, causes and prevention**. (R. van Otterdijk, A. Meybeck, Eds.) Save Food Interantional Congress. **Anais...Dusseldorf: FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS**, 2011 Disponível em: <<http://www.fao.org/docrep/014/mb060e/mb060e00.pdf>>

GWANPUA, S. G. et al. Kinetic modeling of firmness breakdown in “Braeburn” apples stored under different controlled atmosphere conditions. **Postharvest Biology and Technology**, v. 67, p. 68–74, maio 2012.

GWANPUA, S. G. et al. Towards Flexible Management of Postharvest Variation in Fruit Firmness of Three Apple Cultivars. **Postharvest Biology and Technology**, v. 85, p. 18–29, nov. 2013.

HERTOG, M. L. A. T. M. et al. A dynamic and generic model of gas exchange of respiring produce: the effects of oxygen, carbon dioxide and temperature. **Postharvest Biology and Technology**, v. 14, n. 3, p. 335–349, nov. 1998.

HERTOG, M. L. A. T. M. et al. Predicting keeping quality of strawberries (cv. ‘Elsanta’) packed under modified atmospheres: an integrated model approach. **Postharvest Biology and Technology**, v. 15, n. 1, p. 1–12, jan. 1999.

HERTOG, M. L. A. T. M. The Impact of Biological Variation on Postharvest Population Dynamics. **Postharvest Biology and Technology**, v. 26, n. 3, p. 253–263, 2002.

HERTOG, M. L. A. T. M. et al. Shelf life modelling for first-expired-first-out warehouse management. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 372, n. 2017, p. 20130306–20130306, 5 maio 2014.

HERTOG, M. L. A. T. M. et al. From Sensor Output to Improved Product Quality. **Acta**

- Horticulturae**, v. 1091, n. 1091, p. 165–173, ago. 2015.
- HERTOG, M. L. A. T. M.; NICHOLSON, S. E.; JEFFERY, P. B. The Effect of Modified Atmospheres on the Rate of Firmness Change of “Hayward” Kiwifruit. **Postharvest Biology and Technology**, v. 31, n. 3, p. 251–261, mar. 2004.
- HILLS, B. P. The power and pitfalls of deductive modelling. In: TIJSKENS, L. M. M.; HERTO, M. L. A. T. M.; NICOLAÏ, B. M. (Eds.). . **Food process modelling**. First ed. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2001. p. 3–17.
- HÖRTENSTEINER, S. Chlorophyll Degradation During Senescence. **Annual Review of Plant Biology**, v. 57, n. 1, p. 55–77, jun. 2006.
- INSTITUTO ADOLFO LUTZ. **Métodos físicos-químicos para análise de Alimentos**. 1^a edição ed. São Paulo: Instituto Adolfo Lutz, 2008.
- JEDERMANN, R. et al. Remote quality monitoring in the banana chain. **Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences**, v. 372, n. 2017, p. 20130303, 2014a.
- JEDERMANN, R. et al. Reducing food losses by intelligent food logistics. **Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences**, v. 372, p. 20130302, 2014b.
- JOHNSTON, J. W.; HEWETT, E. W.; HERTO, M. L. A. T. M. Apple (*Malus domestica*) Softening in the Postharvest Coolchain: Effects of Delayed Cooling and Shelf-Life Temperatures. **New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science**, v. 33, n. 3, p. 283–292, set. 2005.
- KADER, A. A. Biochemical and physiological basis for effects of controlled and modified atmospheres on fruits and vegetables. **Food technology**, v. 40, n. 5, p. 99–104, 1986.
- KADER, A. A. Postharvest Biology and Technology: An Overview. In: KADER, A. A. (Ed.). . **Postharvest Technology of Horticultural Crops**. Third ed. Oakland: University of California Agricultural and Natural Resources, 2002a. p. 39–48.
- KADER, A. A. Standardization and inspection of fresh fruits and vegetables. In: KADER, A. A. (Ed.). . **Postharvest Technology of Horticultural Crops**. Third ed. Oakland: University of California Agricultural and Natural Resources, 2002b. p. 287–300.
- KETZENBERG, M.; BLOEMHOF, J.; GAUKLER, G. Managing Perishables with Time and Temperature History. **Production and Operations Management**, v. 24, n. 1, p. 54–70, jan. 2015.
- LABUZA, T. P. **Shelf-Life Dating of Foods**. First ed. Westport: Food & Nutrition Press, Inc., 1982.
- LABUZA, T. P. Application of chemical kinetics to deterioration of foods. **Journal of Chemical Education**, v. 61, n. 4, p. 348, abr. 1984.
- LEONARDI, C.; BAILLE, A.; GUICHARD, S. Effects of Fruit Characteristics and Climatic Conditions on Tomato Transpiration in a Greenhouse. **The Journal of Horticultural Science and Biotechnology**, v. 74, n. 6, p. 748–756, 7 jan. 1999.

LICHTER, A. et al. Physical and Visual Properties of Grape Rachis as Affected by Water Vapor Pressure Deficit. **Postharvest Biology and Technology**, v. 59, n. 1, p. 25–33, jan. 2011.

MA, C. et al. Evaluation on home storage performance of table grape based on sensory quality and consumers' satisfaction. **Journal of Food Science and Technology**, p. 1–8, 16 jan. 2016.

MAGUIRE, K. M.; BANKS, N. H.; OPARA, L. U. Factors Affecting Weight Loss of Apples. In: JANICK, J. (Ed.). **Horticultural Reviews**. Oxford, UK: John Wiley & Sons, Inc., 2001. v. 25p. 197–234.

MAHAJAN, P. V.; GOSWAMI, T. K. Enzyme Kinetics Based Modelling of Respiration Rate for Apple. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 79, n. 4, p. 399–406, ago. 2001.

MAHAJAN, P. V.; OLIVEIRA, F. A. R.; MACEDO, I. Effect of Temperature and Humidity on the Transpiration Rate of the Whole Mushrooms. **Journal of Food Engineering**, v. 84, n. 2, p. 281–288, 2008.

MCLAUGHLIN, C. P.; O'BEIRNE, D. Respiration Rate of a Dry Coleslaw Mix Affected by Storage Temperature and Respiratory Gas Concentrations. **Journal of Food Science**, v. 64, n. 1, p. 116–119, jan. 1999.

MENCARELLI, F.; BELLINCONTRO, A.; DIRENZO, G. **Grape: Post-harvest Operations**. Disponível em: <<http://www.fao.org/3/a-av004e.pdf>>. Acesso em: 10 dez. 2016.

MONTANARI, R. Cold chain tracking: a managerial perspective. **Trends in Food Science and Technology**, v. 19, n. 8, p. 425–431, 2008.

NELSON, K. E. Pre-cooling - Its Significance to the Market Quality of Table Grapes. **International Journal of Refrigeration**, v. 1, n. 4, p. 207–215, 1978.

NGCOBO, M. E. K. et al. Moisture loss characteristics of fresh table grapes packed in different film liners during cold storage. **Biosystems Engineering**, v. 113, n. 4, p. 363–370, 2012.

NGCOBO, M. E. K. et al. Moisture Diffusivity of Table Grape Stems During Low Temperature Storage Conditions. **Biosystems Engineering**, v. 115, n. 3, p. 346–353, 2013.

NUNAN, K. J. et al. Changes in cell wall composition during ripening of grape berries. **Plant physiology**, v. 118, n. 3, p. 783–92, 1998.

NUNES, M. C. N. et al. Environmental Conditions Encountered During Typical Consumer Retail Display Affect Fruit and Vegetable Quality and Waste. **Postharvest Biology and Technology**, v. 51, n. 2, p. 232–241, 2009.

OIV. **World Vitiviniculture Situation**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<http://www.oiv.int/public/medias/5029/world-vitiviniculture-situation-2016.pdf>>.

PALOU, L. et al. Minimum constant sulfur dioxide emission rates to control gray mold of cold-stored table grapes. **American Journal of Enology and Viticulture**, v. 53, n. 2, p. 110–115, 2002.

- PALOU, L. et al. Effect of continuous exposure to exogenous ethylene during cold storage on postharvest decay development and quality attributes of stone fruits and table grapes. **Postharvest Biology and Technology**, v. 27, n. 3, p. 243–254, mar. 2003.
- PALOU, L. et al. New Approaches for Postharvest Quality Retention of Table Grapes. **Fresh Produce**, v. 4, n. Special Issue 1, p. 103–110, 2010.
- PAULL, R. E. Effect of temperature and relative humidity on fresh commodity quality. **Postharvest Biology and Technology**, v. 15, n. 3, p. 263–277, mar. 1999.
- RABAN, E. et al. Rachis browning in four table grape cultivars as affected by growth regulators or packaging. **Postharvest Biology and Technology**, v. 84, p. 88–95, out. 2013.
- RAVINDRA, M. R.; GOSWAMI, T. K. Modelling the respiration rate of green mature mango under aerobic conditions. **Biosystems Engineering**, v. 99, n. 2, p. 239–248, 2008.
- REN, K. et al. Kinetic modelings of broccoli color changes during chilled storage. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 30, n. 2, p. 180–193, abr. 2006.
- RICO, D. et al. Extending and measuring the quality of fresh-cut fruit and vegetables: a review. **Trends in Food Science and Technology**, v. 18, n. 7, p. 373–386, 2007.
- ROGIERS, S. Y. et al. Grape berry cv. Shiraz epicuticular wax and transpiration during ripening and preharvest weight loss. **American Journal of Enology and Viticulture**, v. 55, n. 2, p. 121–127, 2004.
- ROSALES, R. et al. Molecular analysis of the improvement in rachis quality by high CO₂ levels in table grapes stored at low temperature. **Postharvest Biology and Technology**, v. 77, p. 50–58, 2013.
- ROSS, T. Indices for performance evaluation of predictive models in food microbiology. **Journal of Applied Microbiology**, v. 81, n. 5, p. 501–508, 1996.
- SANDHYA. Modified atmosphere packaging of fresh produce: Current status and future needs. **LWT - Food Science and Technology**, v. 43, n. 3, p. 381–392, 2010.
- SASTRY, S. .; BUFFINGTON, D. . Transpiration rates of stored perishable commodities: a mathematical model and experiments on tomatoes. **International Journal of Refrigeration**, v. 6, n. 2, p. 84–96, mar. 1983.
- SCHOUTEN, R. E. et al. Predictability of keeping quality of strawberry batches. **Postharvest Biology and Technology**, v. 26, n. 1, p. 35–47, ago. 2002.
- SCHOUTEN, R. E. et al. Modelling the acceptance period of truss tomato batches. **Postharvest Biology and Technology**, v. 45, n. 3, p. 307–316, 2007a.
- SCHOUTEN, R. E. et al. Modelling Quality Attributes of Truss Tomatoes: Linking Colour and Firmness Maturity. **Postharvest Biology and Technology**, v. 45, n. 3, p. 298–306, set. 2007b.
- SCHOUTEN, R. E.; TIJSKENS, L. M. .; VAN KOOTEN, O. Predicting keeping quality of batches of cucumber fruit based on a physiological mechanism. **Postharvest Biology and Technology**, v. 26, n. 2, p. 209–220, 2002.
- SHAHI, S. K. et al. Use of essential oil as botanical-pesticide against post harvest spoilage in

Malus pumilo fruits. **BioControl**, v. 48, n. 2, p. 223–232, 2003.

SHIBAIRO, S. I.; UPADHYAYA, M. K.; TOIVONEN, P. M. . Changes in Water Potential, Osmotic Potential, and Tissue Electrolyte Leakage During Mass Loss in Carrots Stored Under Different Conditions. **Scientia Horticulturae**, v. 95, n. 1–2, p. 13–21, ago. 2002.

SILVA-SANZANA, C. et al. Effect of modified atmosphere packaging (MAP) on rachis quality of “Red Globe” table grape variety. **Postharvest Biology and Technology**, v. 119, p. 33–40, set. 2016.

SLOOF, M.; EVEREST, B. V. Problem decomposition. In: TIJSKENS, L. M. M.; HERTOOG, M. L. A. T. M.; NICOLAÏ, B. M. (Eds.). . **Food process modelling**. First ed. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2001. p. 19–34.

SLOOF, M.; TIJSKENS, L. M. M.; WILKINSON, E. C. Concepts for modelling the quality of perishable products. **Trends in Food Science & Technology**, v. 7, n. 5, p. 165–171, maio 1996.

SONKER, N.; PANDEY, A. K.; SINGH, P. Strategies to control post-harvest diseases of table grape: a review. **Journal of Wine Research**, v. 1264, n. April, p. 1–18, 15 mar. 2016.

SOUSA-GALLAGHER, M. J.; MAHAJAN, P. V.; MEZDAD, T. Engineering Packaging Design Accounting for Transpiration Rate: Model Development and Validation with Strawberries. **Journal of Food Engineering**, v. 119, n. 2, p. 370–376, 2013.

TAOUKIS, P. S.; GIANNAKOUROU, M. C. Temperature and food stability: analysis and control. In: STEELE, R. (Ed.). . **Understanding and measuring shelf-life of food**. First ed. Boca Raton: CRC Press, 2004. p. 42–65.

TAOUKIS, P. S.; LABUZA, T. P. Applicability of Time-Temperature Indicators as Shelf Life Monitors of Food Products. **Journal of Food Science**, v. 54, n. 4, p. 783–788, jul. 1989.

THOMPSON, J. F. Psychrometrics and Perishable Commodities. In: KADER, A. A. (Ed.). . **Postharvest Technology of Horticultural Crops**. Third ed. Oakland: University of California Agricultural and Natural Resources, 2002. p. 129–134.

TIJSKENS, L. M. M. et al. Water Loss in Horticultural Products - Modelling, Data Analysis and Theoretical Considerations. **Acta Horticulturae**, n. 858, p. 465–471, mar. 2010.

TIJSKENS, L. M. M.; POLDERDIJK, J. J. A generic model for keeping quality of vegetable produce during storage and distribution. **Agricultural Systems**, v. 51, n. 4, p. 431–452, 1996.

TIJSKENS, L. M. M.; SCHOUTEN, R. E. Modeling Quality Attributes and Quality Related Product Properties. In: FLORKOWSKI, W. J. et al. (Eds.). . **Postharvest Handling**. [s.l.] Elsevier, 2009. p. 411–448.

USDA. **United States Standards for Grades of Table Grapes (European or Vinifera Type)**. Disponível em:

<https://www.ams.usda.gov/sites/default/files/media/Table_Grape_Standard%5B1%5D.pdf>.

Acesso em: 24 nov. 2016.

VALVERDE, J. M. et al. Novel edible coating based on Aloe vera gel to maintain table grape quality and safety. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 53, n. 20, p. 7807–7813, 2005.

VAN BOEKEL, M. On the use of the Weibull model to describe thermal inactivation of microbial vegetative cells. **International Journal of Food Microbiology**, v. 74, n. 1–2, p. 139–159, 25 mar. 2002.

VENUS, V. et al. Development and validation of a model to estimate postharvest losses during transport of tomatoes in West Africa. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 92, p. 32–47, mar. 2013.

WATADA, A. E.; KO, N. P.; MINOTT, D. A. Factors affecting quality of fresh-cut horticultural products. **Postharvest Biology and Technology**, v. 9, n. 2, p. 115–125, 1996.

WATHERHOUSE, A. L. Wine Phenolics. **Annals of the New York Academy of Sciences**, v. 957, n. 1, p. 21–36, maio 2002.

WILLS, R. B. H. et al. **Postharvest: an introduction to the physiology and handling of fruit, vegetables and ornamentals**. Wallingford: CABI, 2007.

WU, C.-T. **An overview of postharvest biology and technology of fruits and vegetables**. (C.-C. Huang et al., Eds.) AARDO Workshop on Technology on Reducing Post-harvest Losses and Maintaining Quality of Fruits and Vegetables. **Anais...**Taiwan: Taiwan Agricultural Research Institute, 2010. Disponível em: <<http://210.69.150.18:8080/retrieve/13014/no147all-1.pdf#page=17>>

WU, Z. et al. Heat acclimation reduces postharvest loss of table grapes during cold storage – Analysis of possible mechanisms involved through a proteomic approach. **Postharvest Biology and Technology**, v. 105, p. 26–33, jul. 2015.

XU, W.-T. et al. Postharvest grapefruit seed extract and chitosan treatments of table grapes to control *Botrytis cinerea*. **Postharvest Biology and Technology**, v. 46, n. 1, p. 86–94, out. 2007.